

УДК 67.05

С. А. Болсуновский<sup>1</sup>, д-р техн. наук В. Д. Вермель<sup>1</sup>, Г. А. Губанов<sup>2</sup>, В. В. Зиняев<sup>1</sup><sup>1</sup> Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ),<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ ФАИТ);

г. Жуковский, Россия

## ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ЧПУ, ОСНАЩЕННОГО ИНТЕГРИРОВАННЫМ МОТОР-ШПИДЕЛЕМ (ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ)

Рассматривается задача обеспечения максимальной производительности высокоскоростной фрезерной обработки на обрабатывающем центре с ЧПУ с интегрированным мотор-шпинделем, исходя из располагаемой мощности (соответствует черновой обработке) при изготовлении обводообразующих деталей аэродинамических моделей самолётов или формообразующей технологической оснастки.

*Производительность, обрабатывающий центр, мотор-шпиндель, высокоскоростное фрезерование*

### 1 Постановка задачи

Целью исследования является анализ условий, обеспечивающих максимальную производительность фрезерной обработки на обрабатывающем центре с ЧПУ, оснащённым интегрированным мотор-шпинделем.

Производительность черновой обработки определяется объемом материала, срезаемым фрезой в единицу времени:

$$Q = a_e a_p v_f,$$

где  $a_e$  — ширина фрезерования,  $a_p$  — глубина фрезерования,  $v_f$  — минутная подача.

В качестве обрабатываемого материала рассматривается сталь 30ХГСА — основной конструкционный материал аэродинамических моделей самолётов.

Для высокоскоростного фрезерования диапазон рекомендуемых производителями современного инструмента значений скоростей резания весьма узок [1], что позволяет принять скорость резания  $v_c$  для конкретных материала заготовки и материала режущих пластин как постоянную. Данное предположение также подтверждается систематическими экспериментальными технологическими исследованиями, нашими и зарубежными [2, 3].

Максимальную толщину стружки  $h_{ex}$  также выбираем по рекомендациям в соответствии с принятой величиной  $v_c$ .

В качестве варьируемых параметров принимаем диаметр фрезы  $D_c$  и глубину фрезерования  $a_p$ , при данной ширине фрезерования  $a_e = kD_c$ , где  $0 < k \leq 1$ .

### 2 Оценка потребной мощности

Силу резания можно оценить по формуле [1]:

$$F_t = k_c S, \quad (1)$$

где  $F_t$  — касательная сила резания,  $k_c$  — удельная сила резания,  $S$  — площадь поперечного сечения срезанного слоя.

Удельная сила резания от толщины стружки определяется известной зависимостью [1]:

$$k_c = k_{c1} h^{-m_c}, \quad (2)$$

где  $h$  — толщина срезанного слоя,  $k_{c1}$  и  $m_c$  — коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала и материала инструмента. Их значения задаются в справочной литературе [1].

Таким образом, из (1) и (2):

$$F_t = k_{c1} a_p h^{1-m_c}. \quad (3)$$

В процессе резания толщина стружки меняется. Для удобства введем среднюю силу резания на один зуб, находящийся в резании, которую будем вычислять по формуле (3) при значении толщины стружки, равном ее средней толщине:

$$\langle F_t \rangle = k_{c1} \langle h \rangle^{1-m_c} a_p, \quad (4)$$

где  $\langle \rangle$  — усреднение.

Среднее значение удельной силы резания  $\langle k_c \rangle$  также будем вычислять для средней толщины стружки:

$$\langle k_c \rangle = k_{c1} \langle h \rangle^{-m_c}. \quad (5)$$

Средняя механическая мощность, потребная для обработки

$$N = \langle F_t \rangle > N_z v_c, \quad (6)$$

где  $N_z$  — среднее число зубьев, находящихся в резании.

Принимая во внимание инерционность шпинделя («эффект маховика»), в последующих оценках можно использовать именно среднюю, а не максимальную мощность.

### 3 Ограничения на производительность обработки

Из приведенных соотношений (1)–(6) вытекает зависимость между затрачиваемой мощностью  $N$  и производительностью  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{\langle k_c \rangle} N.$$

Т. е. производительность обработки пропорциональна затрачиваемой механической мощности.

На рис. 1 построена характерная зависимость располагаемой мощности  $N$  фрезерного обрабатывающего центра с интегрированным моторшпинделем от частоты вращения шпинделя  $n$  (эксплуатируемый в ЦАГИ DMU 70 eVolution). Важнейшим отличием от шпинделя с приводом от редуктора является резкое падение мощности с уменьшением частоты вращения ниже критической ( $\approx 3000$  об/мин).

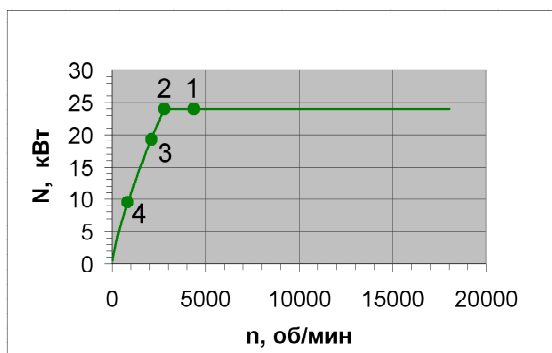


Рис. 1. График зависимости мощности  $N$  от частоты вращения шпинделя  $n$

Необходимая для обработки частота  $n$  вращения определяется данной скоростью резания  $v_c$  и диаметром фрезы  $D_c$ :

$$n = \frac{v_c}{\pi D_c}. \quad (7)$$

Все значения параметров инструмента приняты далее для фрез производства фирмы Sandvik Coromant, серии CoroMILL 300, материал режущих пластин GC2040.

Т. к.  $v_c$  фиксирована, устанавливается однозначное соответствие между частотой вращения и диаметром  $D_c$ . В результате получаем зависимость между располагаемой максимальной мощностью привода  $N$  и диаметром фрезы  $D_c$ , потребляющей данную мощность при обработке (рис. 2). Для иллюстрации соответствия графиков на них нанесен ряд соответствующих точек (1, 2, 3, 4). На графике видно, что для малых диаметров, вплоть до 20 мм, шпиндель может развивать полную мощность, а на больших диаметрах — мощность падает вследствие уменьшения частоты вращения шпинделя с ростом  $D_c$  при фиксированной  $v_c$ .

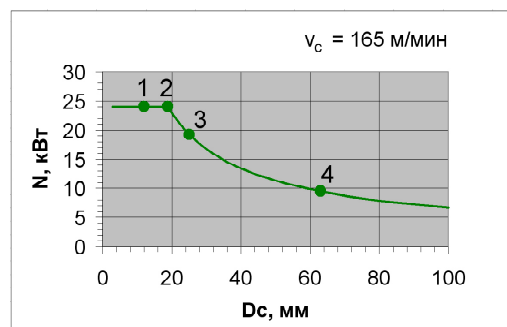


Рис. 2. График зависимости мощности  $N$  от диаметра фрезы  $D_c$

По располагаемой мощности можно рассчитать предельную производительность  $Q$  от диаметра фрезы  $D_c$  и числа зубьев  $z_n$  (рис. 3). Видно, что для фрез с  $D_c \leq 20$  мм максимальная мощность и формально возможная производительность одинаковы. Увеличение  $D_c > 20$  мм ведет к снижению производительности, ограничиваемой максимальной располагаемой мощностью, снижающейся при соответствующем снижении оборотов для фиксированной  $v_c$  (7).

Однако очевидно, что уменьшение диаметра приводит к снижению прочности фрезы и соответствующему ограничению производительности по допустимым усилиям на фрезе и возможности использования располагаемой мощности мотора-шпинделя.

По значениям предельно допустимых усилий построим ограничения производительности  $Q$  для фрез с разными диаметрами и относительными вылетами режущей части (рис. 3).

На графике видно, что принятые прочностные ограничения существенно снижают производительность для фрез с малыми значениями  $D_c$  и практически не работают для диаметров  $D_c > 25$  мм. Наряду с ними, на графике построены конструктивные ограничения по глубине фрезерования, особо существенные для корпус-

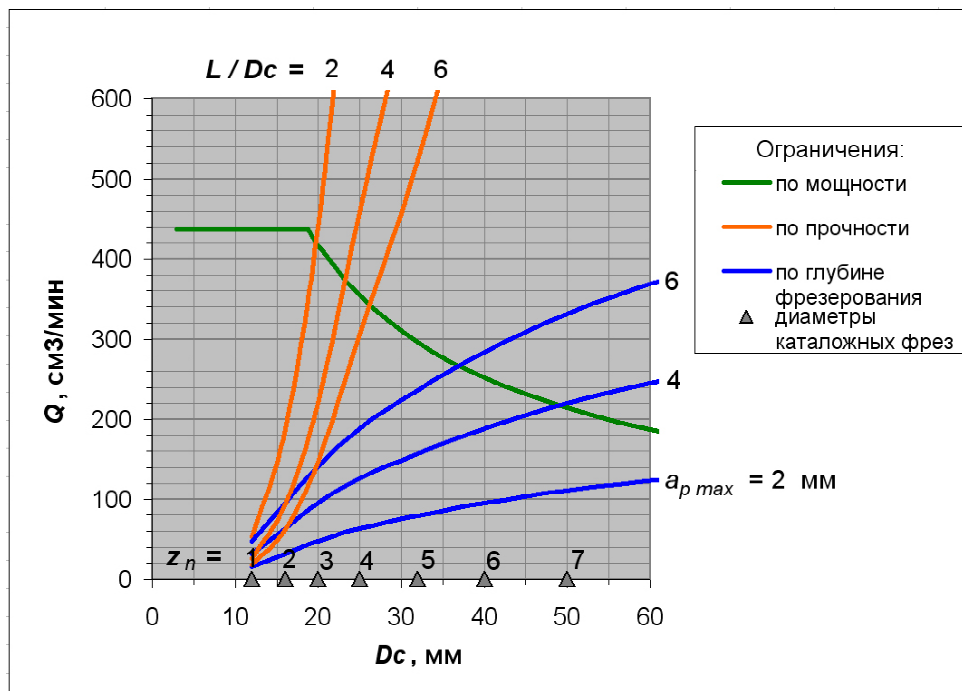


Рис. 3. График ограничений предельной производительности  $Q$  для фрез с разными диаметрами

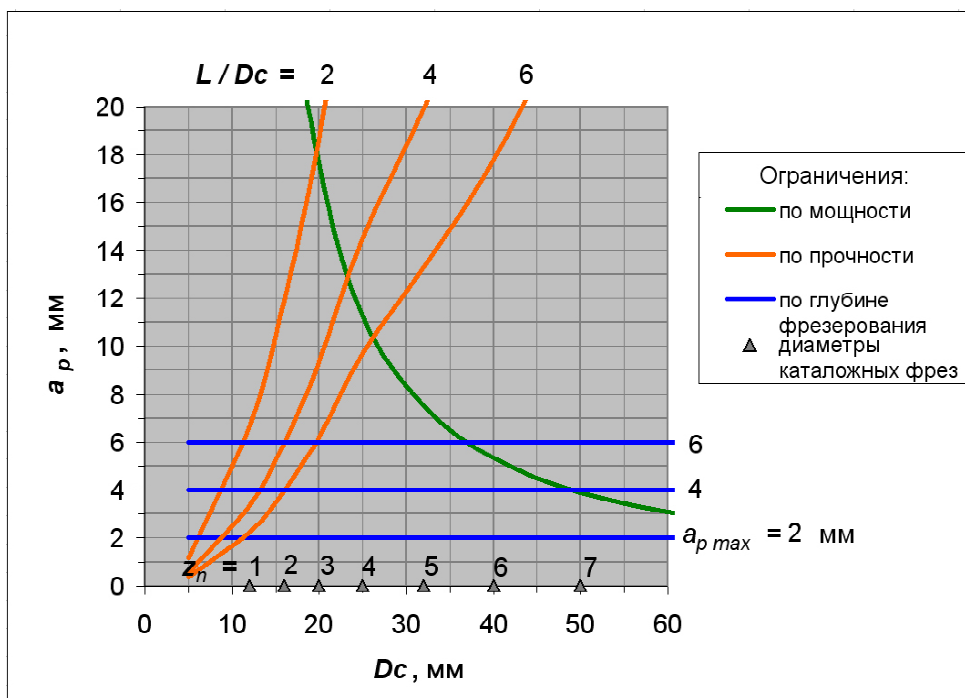


Рис. 4. График ограничений глубины фрезерования  $a_p$  для фрез с разными диаметрами

ных фрез со сменными режущими пластинами. Анализ ограничений показывает, что использовать при черновой обработке максимальную мощность мотора-шпинделя практически не удастся. Рациональный выбор параметров фрезы для черновой обработки должен выполняться исходя из рассмотрения ограничений и возможной глуби-

ны резания, определяемой размером режущей части. На рис. 4 график перестроен в параметрах  $a_p(D_c)$ . На нем видно, что именно ограничения по глубине фрезерования существенно ограничивают возможности по использованию располагаемой мощности и в 2–10 раз снижают определяемую ей максимальную производительность.

Из графиков (рис. 3 и 4) можно оценить уровень использования мощности обрабатывающего центра и, соответственно, производительность обработки для данного инструмента и обрабатываемого материала. Она соответствует точкам пересечения введенных ограничений.

#### 4 Сравнение производительности обрабатывающих центров с редуктором и интегрированным мотор-шпинделем

Сравним значения максимальной производительности известного станка российского производства середины 80-х годов ФП-27 с редуктором и DMU 70 eVolution.

На рис. 5 построены ограничения по располагаемой мощности для рассматриваемых станков. Также на графике нанесены ограничения по прочности фрез и возможной конструктивной глубине фрезерования. Данные ограничения характеризуют инструмент и от параметров станка не зависят.

Из графика видно, что для фрез с диаметром  $D_c \leq 32$  мм производительность станка с интегрированным мотор-шпинделем выше, чем с редуктором, что связано со значительными потерями мощности на редукторе при повышении оборотов. Однако располагаемая мощность мотор-шпинделя для основных типоразмеров фрез используется не полностью. При больших диаметрах фрез растет производительность фрезерования у станка с редуктором, позволяющего в полной мере реализовать для них располагаемую мощность. В тех случаях, когда форма детали является весьма сложной и диктует ограничения на размеры инструмента уже на этапе черновой обработки, целесообразно проведение всех стадий обработки на одном современном обрабатывающем центре с ЧПУ (за исключением выполнения габаритов заготовки). Черновую обработку в большом объеме целесообразно выполнять на станках с редуктором фрезами большого диаметра.

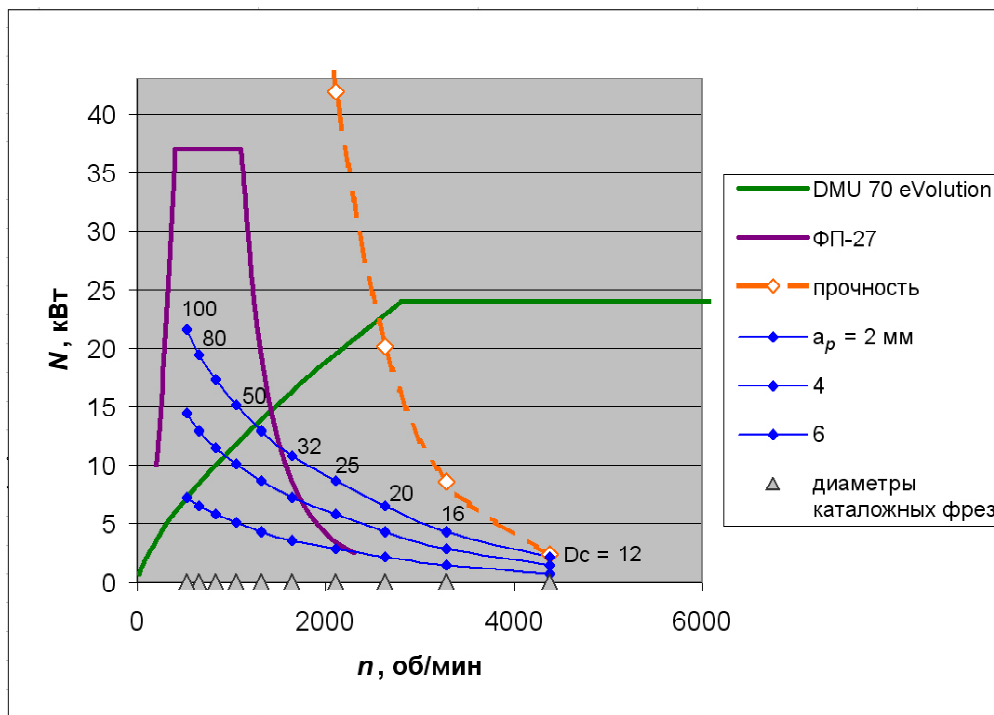


Рис. 5. График ограничений по располагаемой мощности

#### Перечень ссылок

1. Вращающийся инструмент //Каталог металлорежущего инструмента фирма Sandvik Coromant. – 2008.
2. Вермель В. Д. Опыт высокоскоростной обработки авиационных деталей на станках с ЧПУ / Вермель В. Д. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 5 (31). – С. 60–64.
3. Katsuyoshi Karino Trouble shooting for cutting / Katsuyoshi Karino. – Mitsubishi materials, 1998.

Поступила в редакцию 13.07.2009

**S. A. Bolsunovsky, V. D. VermeI, G. A. Gubanov, V. V. Zinyayev**

**ASSESSMENT OF MAXIMUM PERFORMANCE OF NUMERICALLY-CONTROLLED MACHINING CENTER EQUIPPED WITH INTEGRATED MOTOR-SPINDLE (ENERGY ASPECT)**

*Розглядається задача забезпечення максимальної продуктивності високошвидкісної фрезерної обробки на обробному центрі з ЧПК з інтегрованим мотор-шпинделем, виходячи з належної потужності (відповідає чорновій обробці) при виготовленні обвідообразуючих частин аеродинамічних моделей літаків або формообразуючого технологічного обладнання.*

***Продуктивність, обробний центр, мотор-шпиндель, високошвидкісне фрезерування***

*There is reviewed provision of maximum efficiency of high-speed milling on NC processing center with integrated motor-spindle depending on available power (which corresponds to roughing) for manufacturing of line-forming parts of aerodynamic models of airplanes or shape-forming production accessories.*

***Efficiency, machining center, motor-spindle, high-speed milling***