

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №2 (128). С. 32-43.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №2 (128). P. 32-43.

Научная статья  
УДК 621.914  
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-32-43

## **Определение оптимальных режимов резания аналитико-графическим методом для обеспечения заданной микронеровности фрезерованной поверхности**

**Владимир Фёдорович Макаров<sup>1</sup>**, д.т.н., **Игорь Николаевич Сединин<sup>2</sup>**, аспирант  
<sup>1,2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия,  
<sup>2</sup>ОДК-СТАР, Пермь, Россия  
<sup>1</sup>makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>,  
<sup>2</sup>sedininigor@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1805-5272>

***Аннотация.** Для определения функции шероховатости поверхности, после выполнения торцевого фрезерования, представлен полный факторный эксперимент. Рассчитаны адекватная математическая модель шероховатости и значимые переменные. Спроецированы гиперповерхности и линии уровней функции, графоаналитически определены оптимальные и максимальные режимы резания.*

***Ключевые слова:** торцевое фрезерование, твёрдый сплав, полный факторный эксперимент, профилограмма шероховатости, математическая модель, гиперповерхность, линии уровней*

***Для цитирования:** Макаров В.Ф., Сединин И.Н. Определение оптимальных режимов резания аналитико-графическим методом для обеспечения заданной микронеровности фрезерованной поверхности // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 32-43. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-32-43.*

Original article

## **Determination of the optimal and productive cutting conditions using the analytical-graphic method to ensure a reference fine irregularity of the milled finish**

**Vladimir F. Makarov**, Dr. Sn. Tech., **Igor N. Sedinin**, Post graduate student  
<sup>1,2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,  
<sup>2</sup>ODK-STAR, Perm, Russia  
<sup>1</sup>makarovv@pstu.ru, <sup>2</sup>sedininigor@rambler.ru

***Annotation.** For determination of the surface roughness function after face milling a complete factorial experiment has been featured. An adequate mathematical model of roughness and significant variables are calculated. Hypersurfaces and function level lines are projected, optimal and maximum cutting modes are found in a graphical-analytic way.*

***Keywords:** ace milling, carbide material, complete factorial experiment, roughness profile diagram, mathematical model, hypersurface, level lines*

***For citation:** Makarov V.F., Sedinin I.N. Determination of the optimal and productive cutting conditions using the analytical-graphic method to ensure a reference fine irregularity of the milled finish / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No.2 (128), pp. 32-43. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-32-43.*

## Введение

В условиях конкуренции новых российских самолётов МС-21-300 и ИЛ-114-300 с мировыми лидерами: Airbus (Франция), Boeing (США) и Bombardier (Канада) повышение производительности и обеспечение качества является актуальной проблемой гражданского авиастроения.

На газотурбинных двигателях новых российских самолётов устанавливаются топливные насосы, регуляторы, дроссели, автоматы распределения и клапаны, которые входят в агрегаты дозирования топлива комплексной электронно-гидромеханической системы автоматического управления ДТ-14М и НР-65СТМ. Основными изготовителями данных агрегатов являются машиностроительные предприятия: «ОДК-СТАР»; «Агрегат»; «МПО им. И. Румянцева»; «Агат»; «Высокие Технологии» («Омский агрегатный завод»).

Для надёжной работы в составе агрегатов используются износостойкие высокопрочные прецизионные детали. Например, при сборке входящей в топливный узел детали «Корпус селектора» устанавливаются различные плунжера и золотники, работающие в нагруженных и агрессивных средах, что требует высокого качества и износостойкой контактной поверхности, поэтому такие детали выполняются из закалённых коррозионноустойчивых сталей.

Согласно конструкторской документации для закалённых деталей, основными требованиями являются обеспечение шероховатости сопрягаемых уплотняющих поверхностей  $Ra \leq 0,10 \dots 0,63$  мкм и отклонение от плоскостности  $\Delta \leq 0,01 \dots 0,02$  мм. Проблема получения таких параметров связана с высокой твёрдостью материала 59...61 HRC (по методу Роквелла), поэтому окончательная обработка производится при помощи дополнительной операции, такой как шлифование.

При выполнении шлифования образуются прижоги, трещины, включения абразивных частиц в обрабатываемую поверхность, что является недопустимыми дефектами поверхностного слоя ответственных деталей. В современное время одним из методов устранения указанных дефектов является применение окончательного фрезерования вместо шлифования, однако рекомендаций для обеспечения требуемого качества поверхности при фрезерной обработке недостаточно.

Для оптимизации процесса фрезерования закалённой стали – применения быстрого рас-

чета и управления параметрами, исследована математическая зависимость – функция шероховатости  $Ra$  (мкм) [1]. Проведены теоретические расчёты и натурный эксперимент торцевого фрезерования образцов деталей «Корпус селектора», применяемых в агрегатах топливоподачи.

Материал образцов состоял из коррозионноустойчивой стали марки 95X18-Ш [2], закалённой до твёрдости 59...61 HRC, а габариты выполнены с размерами: 41×35×18 мм (Д×Ш×В). При обработке плоской поверхности с периметром 41×35 мм требовалось обеспечить шероховатость  $Ra \leq 0,63$  мкм.

## Выбор оборудования, измерительного и режущего инструмента

С целью повышения жёсткости системы СПИД (станок приспособление инструмент деталь) и точности обработки применён вертикально-фрезерный станок с системой ЧПУ (числовое программное управление) мод. Emcomill E600. Технические характеристики станка: перемещение по 3-м координатам; диапазон оборотов 10 000 об/мин; мощность привода 13 кВт; крутящий момент 83 Нм; точность 6 мкм; тип отверстия шпинделя под оправку MAS 403 BT40; система ЧПУ Siemens SINUMERIK 828D.

Для измерения обработанной поверхности образцов применены высокоточные приборы и оборудование. Контроль размеров, установка и настройка положения образца в станке производилась контактным триггерным 3D датчиком OMP 40-2 с оптической передачей сигнала фирмы Renishaw и точностью 0,001 мм. Для измерения шероховатости  $Ra$  (мкм) обработанной поверхности образца применён цифровой контактный профилометр Mahr Surf PS1 с USB и разрешением профиля 8...32 нм. Обработка и вывод результатов профилограмм реализован на персональном компьютере программой MarSurf PS1 Explorer v1.20-07.

Выбор типа фрезы обоснован расположением (доступом), размером и геометрией обрабатываемой поверхности. Так как обработка плоской поверхности открытая, то для неё подходят как торцевые, так и цилиндрические фрезы. Торцевые фрезы, по сравнению с цилиндрическими, обладают большей жёсткостью в станке, участием в резании двух режущих кромок – главной и вспомогательной (зачищающей), большим углом контакта диамет-

ра с заготовкой и доступным способом оснащения их сменными режущими пластинами [3]. Поэтому использование торцовых фрез повышает производительность, снижает шероховатость обрабатываемой поверхности и является наиболее распространённым. Суммируя изложенные характеристики, принято решение о применении в исследовании торцевой фрезы.

$$D_{\text{раб}} = (1,2 \dots 1,5) \cdot B_{\text{max}} = (1,2 \dots 1,5) \cdot 35,5 = 42,6 \dots 53,25 \text{ мм} \quad (1)$$

где  $B_{\text{max}}$  – максимальная ширина детали с учётом её допуска, мм.

В качестве производителя режущего инструмента принята шведская фирма «Sandvik Coromant». Согласно каталогу, ближайший стандартный рабочий диаметр  $D_{\text{раб}} = 50$  мм.

Для снижения ударной нагрузки при входе зуба фрезы в материал, а также силы резания, оптимальным является главный угол в плане  $\alpha = 45^\circ$ , так как он обеспечивает баланс осевой и радиальной сил резания и снижает нагрузку на подшипники шпинделя. При этом толщина стружки снижается за счёт увеличения её длины вдоль главной режущей кромки, что повышает сопротивление деформации режущих пластин и обрабатываемого материала.

Для повышения точности обработки при нежёсткой наладке, при входе зуба фрезы в материал, применяют положительный осевой передний угол фрезы. По каталогу принят стандартный положительный осевой передний угол  $\beta = 20^\circ$ , который позволит минимизировать риск возникновения вибрации и сколов

Так как минимальная сторона периметра обрабатываемой поверхности образца составляет 35 мм, далее ширина  $B$ , то необходимо подобрать рабочий диаметр торцевой фрезы, который перекрывает указанную ширину за один прямолинейный проход [4]. В таком случае рабочий диаметр фрезы определяется в соответствии с формулой:

режущей кромки.

Чтобы повысить прочность режущей кромки и улучшить отвод снимаемой стружки применяется отрицательный радиальный передний угол  $\gamma$ . По каталогу принято стандартное значение – позитивно-негативная геометрия радиального переднего угла  $\gamma = -12^\circ$ , что также позволит увеличить обрабатываемость материала за счёт её эффективного удаления стружки.

Вспомогательный задний угол  $\lambda$  служит для уменьшения трения вспомогательной задней поверхности об обработанную поверхность, снижая температуру нагрева пластины и повышая износостойкость. При уменьшении угла  $\lambda$  уменьшается шероховатость обработанной поверхности и повышается прочность вершины лезвия, поэтому принято стандартное значение вспомогательного заднего угла  $\lambda = 9^\circ$ .

Исходя из выбранных параметров, приобретён насадной корпус торцевой фрезы «Sandvik Coromant» CoroMill R245-050Q22-12H [5] (рис. 1).

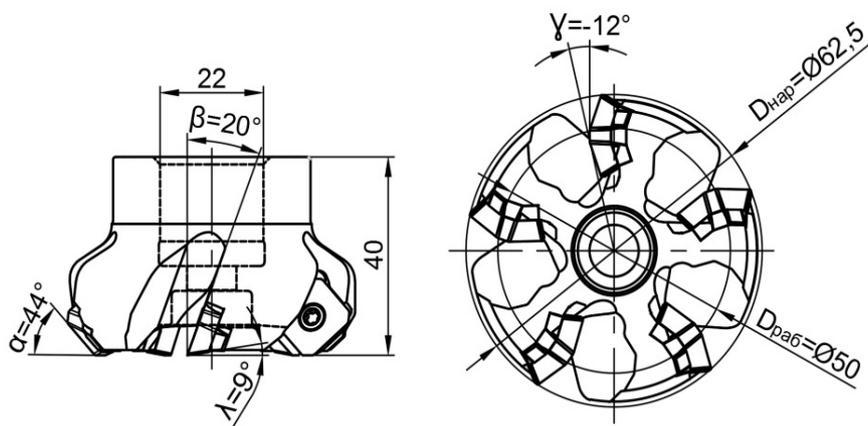


Рис. 1. Геометрические параметры корпуса торцевой фрезы «Sandvik Coromant» CoroMill R245-050Q22-12H

Основные характеристики фрезы: правое исполнение; размер устанавливаемых режущих пластин  $13,4 \times 13,4 \times 3,97$  мм; число уста-

навливаемых пластин 5 шт; угловой шаг зубьев фрезы  $\phi = 72^\circ$ ; равномерное расположение зубьев; частота вращения фрезы до

16 250 об/мин; масса 0,62 кг; материал корпуса сталь.

### Химический состав и свойства стали 95X18-Ш

Для выбора режущих пластин, способных обеспечить технические требования изготавливаемой детали, для начала необходимо рассмотреть технические характеристики обрабатываемого материала.

Массовая доля химических элементов: железо (Fe)  $\leq 82,1$  %; углерод (C) 0,9...1,0 %; хром (Cr) 17...19 %; кремний (Si)  $\leq 0,8$  %; марганец (Mn)  $\leq 0,8$  %; никель (Ni)  $\leq 0,6$  %; медь (Cu)  $\leq 0,3$ ; фосфор (P)  $\leq 0,03$  %; сера (S)  $\leq 0,025$  %.

По химическому составу, при содержании углерода (C) 0,9...1,0 %, сталь является высокоуглеродистой, а при сумме легирующих элементов в сплаве от 18 до 23 % данная сталь относится к высоколегированной. Сталь содержит легирующие элементы и примеси, которые влияют на диаграмму состояния стали, аллотропические превращения и формирование новых фаз. Комбинированное влияние легирующих элементов и термической обработки дает различную микроструктуру и свойства стали. Легирующими элементами в сплаве являются Cr и Ni. Постоянными примесями являются Si, Mn и Cu, а случайными примесями – P и S.

Способ производства отливки, указанный в конце марки стали буквой «Ш», означает, что её изготовление выполнено по технологии электрошлакового переплава металла, а полученная сталь является высококачественной. При таком способе изготовления значительно повышается качество металлов и сплавов, так как при изменении состава шлака и температурного режима процесса осуществляется рафинирование металла. Также снижается содержание серы в 2 – 5 раз, а кислорода и неметаллических включений в 1,5 – 2,5 раза. Слиток характеризуется плотной направленной макроструктурой, свободен от дефектов литейного и усадочного происхождения. Химическая и структурная однородность слитка обуславливает изотропность физических и механических свойств металла.

После комплекса операций по термической обработке, материал образцов приобретает окончательные свойства. Физические свойства: флокочувствительность (склонность стали к поражению трещинами) – не чувстви-

тельна; плотность  $\rho = 7,75$  г/см<sup>3</sup>. Механические свойства: предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 1980...2300$  МПа; твёрдость по методу Роквелла 59...61 HRC; ударная вязкость KCU = 63 Дж/см<sup>2</sup>; предел выносливости  $\sigma_{-1} = 960$  Мпа; при выполненном отпуске с установленной рабочей температурой 160 °С, не склонна к отпусковой хрупкости; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 24$  Вт/(м·°С); удельная теплоёмкость при 100 °С = 482 Дж/(кг·°С). Химические свойства: сталь имеет коррозионную, кислотную стойкость при температуре до 500 °С.

### Выбор материала, покрытия и геометрических параметров режущих пластин

Исходя из полученных данных о свойствах обрабатываемого материала и рекомендаций производителей режущего инструмента, наиболее рациональным материалом режущих пластин для прерывистой фрезерной обработки закалённой стали являются твёрдые сплавы с покрытием. К основным преимуществам твёрдых сплавов относятся устойчивость к пластической деформации, термическому удару и высокая износостойкость [6].

Одним из видов режущих пластин, подходящих для комплектации с корпусом торцевой фрезы «Sandvik Coromant», являются сменные неперетачиваемые режущие пластины, состоящие из твёрдого сплава 1010.

Основа сплава 1010 (НС) является мелкозернистой. Массовая доля химических элементов в сплаве: карбид вольфрама (WC) 92,5 % с содержанием углерода (C) 5,8 %; кобальт (Co) 4,5 %; карбид тантала (TaC) с карбидом ниобия (NbC) 3 %; пластификатор парафин 2 %. Физические свойства: размер сечения зерна карбида 0,5...0,8 мкм – субмикронный; плотность 15,05 г/см<sup>3</sup>; теплопроводность 68,5 Вт/(м·°С). Механические свойства: способность сопротивления растяжению или сжатию при упругой деформации 650 ГПа (Модуль Юнга); предел прочности при изгибе 2600 Н/мм<sup>2</sup>; твёрдость 1800 HV (по Виккерсу). Сплав применяется для обработки чугуна и закалённых сталей при непрерывном и прерывистом полустачивочном точении и фрезеровании.

Основа сплава 1010 имеет многослойное покрытие TiAlN (алюмонитрид титана), полученное методом PVD (физическое осаждение из паровой фазы в вакууме).

При прерывистой обработке закалённой стали режущие пластины рекомендуется использовать со смазочно-охлаждающим технологическим средством (СОТС) в газообразном агрегатном состоянии, применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) недопустимо.

На основе приведённых данных приняты сменные неперетачиваемые режущие пластины фрезы «Sandvik Coromant» шифром R245-12 T3 M-PM сплав 1010 (твёрдый сплав) (рис. 2) [5].

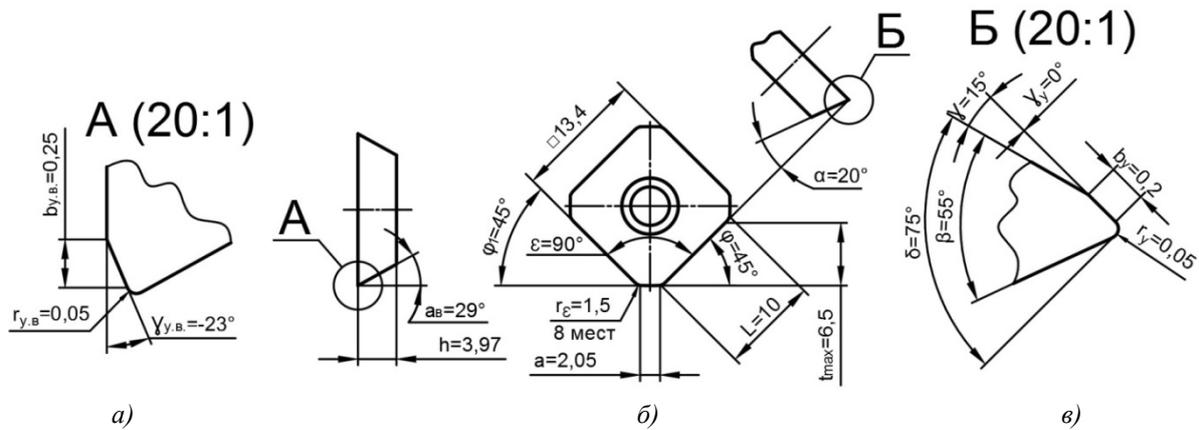


Рис. 2. Режущая пластина «Sandvik Coromant» R245-12 T3 M-PM сплав 1010:

а – микрогеометрия вершины главной режущей кромки; б – основные геометрические параметры (M2:1); в – микрогеометрия главной режущей кромки

Основные характеристики режущей пластины: исполнение R – правое; количество режущих кромок 4; пластина односторонняя; скорость резания  $v = 75...110$  м/мин; подача на зуб  $S_z = 0,10...0,28$  мм/зуб; максимальная глубина резания  $t_{max} = 6,5$  мм; масса 7 г; тип пластины с отверстием; M – наибольшая надёжность режущей кромки; P – область применения по ISO; M – для полуваловой обработки.

### Проведение полного факторного эксперимента

Для нахождения эмпирических математических моделей торцевого фрезерования не-

обходимо установить экспериментальные математические зависимости шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ . В качестве независимых переменных приняты: скорость резания  $v$  (м/мин); подача на зуб  $S_z$  (мм/зуб) и глубина резания  $t$  (мм).

На основе априорных данных о характере искомой зависимости для  $Ra$  принят следующий вид математической модели:

$$Ra = c + \alpha \cdot v + \beta \cdot S_z + \gamma \cdot t, \quad (2)$$

где  $c$ ;  $\alpha$ ;  $\beta$ ;  $\gamma$  – постоянные величины.

После введения членов, учитывающих взаимодействие факторов, уравнение выражено полиномом:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{13} x_1 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (3)$$

где  $y = Ra$  – значение исходного фактора;  $x_1, x_2, x_3$  – кодированные безразмерные значения факторов;  $b_0$  – свободный член, равный отклику системы на начальной стадии эксперимента при  $x_1=x_2=x_3$ ;  $b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты регрессии, показывающие степень влияния соответствующих факторов на выход процесса;  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – коэффициенты, указывающие на наличие эффекта взаимодействия факторов.

Полученное уравнение (3) представляет собой постулированную эмпирическую модель зависимости оптимальной шероховатости об-

работанной поверхности от переменных факторов  $v, S_z, t$ .

С целью определения коэффициентов линейного уравнения использован центральный композиционный ортогональный план второго порядка для трех факторов, для построения которого к полному факторному эксперименту типа  $2^k$  добавляют 1 опыт в центре плана и  $2k$  опытов в «звездных» точках, где  $k$  – число факторов [7].

Таким образом, количество необходимых опытов (точек плана) для центрального композиционного ортогонального плана второго

порядка для трех факторов определяется по формуле:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + 1, \quad (4)$$

где  $2^k$  – число точек ядра;  $2k$  – число «звёздных» точек; 1 – нулевая точка.

Подставив значения в уравнение (4) получено:

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 8 + 6 + 1 = 15.$$

«Звёздное» плечо рассчитано по формуле:

$$\varphi = \sqrt{\sqrt{2^{k-2}} \cdot (\sqrt{N} - \sqrt{2^k})}. \quad (5)$$

$$\varphi = \sqrt{\sqrt{2^{3-2}} \cdot (\sqrt{15} - \sqrt{2^3})} = \sqrt{\sqrt{2} \cdot (3,873 - 2,828)} = 1,215.$$

Для унификации программы проведения полного факторного эксперимента введена специальная скользящая система координат, начало которой совпадает с нулевым уровнем факторов. Масштабы переменных выбраны таким образом, чтобы интервалы варьирования факторов были равны единице (табл. 1).

### 1. Кодирование переменных факторов по уровням варьирования

Уровни варьирования	Независимые переменные, влияющие на <i>Ra</i> (мкм)		
	<i>v</i> , м/мин	<i>S<sub>z</sub></i> , мм/зуб	<i>t</i> , мм
	<i>X<sub>1</sub></i>	<i>X<sub>2</sub></i>	<i>X<sub>3</sub></i>
Верхний (+1)	110	0,14	0,25
Нулевой (основной) (0)	92,5	0,08	0,15
Нижний (-1)	75	0,02	0,05
Интервал варьирования	17,5	0,06	0,10
Верхний в «звездных» точках (+1,215)	113,76	0,153	0,27
Нижний в «звездных» точках (-1,215)	71,24	0,007	0,03

Тогда исходному уровню фактора будет соответствовать 0, верхний и нижний уровни фактора в «ядре» плана, полученные сложением и вычитанием нулевого уровня и шага, будут равны +1 и -1 соответственно, а верхний и нижний уровни фактора в «звёздных» точках – +1,215 и -1,215. В дальнейшем, для упрощения, в матрице планирования экспериментов

убирают числовое значение уровней факторов «1», оставляя только математические символы «+» и «-».

Условия проведения опытов в кодированном масштабе записываются в виде таблицы (матрицы) планирования эксперимента (табл. 2), зависящей только от числа факторов и уровней каждого фактора.

### 2. Матрица планирования эксперимента и результаты опытов

№ опыта	Вспомог. переменная	Планирование				Расчётные факторы						Результаты опытов. Шероховатость <i>Ra</i> , мкм			Средняя шероховатость <i>Ra</i> , мкм
		<i>x<sub>0</sub></i>	<i>x<sub>1</sub></i>	<i>x<sub>2</sub></i>	<i>x<sub>3</sub></i>	<i>x<sub>1x2</sub></i>	<i>x<sub>2x3</sub></i>	<i>x<sub>1x3</sub></i>	<i>x<sub>1x2x3</sub></i>	<i>x<sub>1</sub><sup>2</sup>-0,73</i>	<i>x<sub>2</sub><sup>2</sup>-0,73</i>	<i>x<sub>3</sub><sup>2</sup>-0,73</i>	<i>y<sup>I</sup></i>	<i>y<sup>II</sup></i>	
План $2^3$ («ядро» плана)															
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,27	0,27	0,27	0,233	0,251	0,247	0,244
2	+	+	-	-	-	+	-	+	0,27	0,27	0,27	0,220	0,212	0,217	0,216
3	+	-	+	-	-	-	+	+	0,27	0,27	0,27	0,598	0,603	0,618	0,606
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,27	0,27	0,27	0,549	0,554	0,564	0,556
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,27	0,27	0,27	0,259	0,248	0,264	0,257
6	+	+	-	+	-	-	+	-	0,27	0,27	0,27	0,226	0,231	0,218	0,225
7	+	-	+	+	-	+	-	-	0,27	0,27	0,27	0,630	0,619	0,606	0,618
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,27	0,27	0,27	0,567	0,572	0,581	0,573
Опыты в «звездных» точках															
9	+	-	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,444	0,461	0,451	0,452
10	+	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,409	0,424	0,398	0,410
11	+	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	0,185	0,193	0,197	0,192
12	+	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	0,609	0,605	0,623	0,612
13	+	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	0,415	0,433	0,420	0,423
14	+	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	0,457	0,434	0,439	0,443
Опыт в «нулевой» точке (в центре плана)															
15	+	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0,423	0,428	0,444	0,432

Матрица составлена с учетом всех возможных комбинаций значений факторов. Для определения коэффициентов произведено 8 опытов в «ядре» плана, 6 опытов в «звездных» точках и 1 опыт в центре плана. Так как погрешность метода измерения неизвестна, сделано трехкратное повторение каждого опыта. В матрицу планирования эксперимента введены результаты опытов полученной шероховатости  $Ra$  (мкм) обработанной поверхности образцов.

В первом столбце приведены порядковые номера опытов. Первая строка соответствует опыту № 1, в котором три фактора находятся на нижнем уровне; вторая – опыту № 2, когда первый находится на верхнем уровне, а второй и третий – на нижнем, и т.д.

Во втором столбце – значения вспомогательной (фиктивной) переменной  $x_0$ , вводимой для расчета коэффициента  $b_0$ .

В «расчетном» столбце приведены значения произведения  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$  и т.д., которые вводятся для последующего вычисления коэффициента регрессии  $b_{12}$ ,  $b_{13}$  и т.д. соответственно.

В столбце «результаты опытов» приведены значения полученной экспериментальной шероховатости  $Ra$  в виде обозначений  $y^I$ ,  $y^{II}$ ,  $y^{III}$  –

повторений ( $n$ ) каждого из опытов и  $\bar{y}_j$  – среднееарифметическое значение шероховатости  $Ra$  (мкм).

Полученные экспериментальные данные по всем опытам, согласно кодовым значениям переменных факторов, вносятся в графы значений  $y^j$  матрицы планирования эксперимента.

Из данных в таблице наименьшее значение шероховатости получено в опыте № 11  $Ra = 0,192$  мкм с режимами резания:  $v = 92,5$  м/мин;  $S_z = 0,007$  мм/зуб;  $t = 0,15$  мм. Наибольшее значение шероховатости – в опыте № 7  $Ra = 0,618$  мкм с режимами:  $v = 75$  м/мин;  $S_z = 0,14$  мм/зуб;  $t = 0,25$  мм.

### Сравнение профилограмм шлифования и фрезерования

Для графического сравнения идентичных значений измеренной микронеровности обработанной поверхности закалённого образца, для различных видов механической обработки, представлена профилограмма с оптимальными режимами резания при плоском шлифовании (рис. 3, а) и профилограмма торцевого фрезерования на примере опыта № 10 (рис. 3, б).

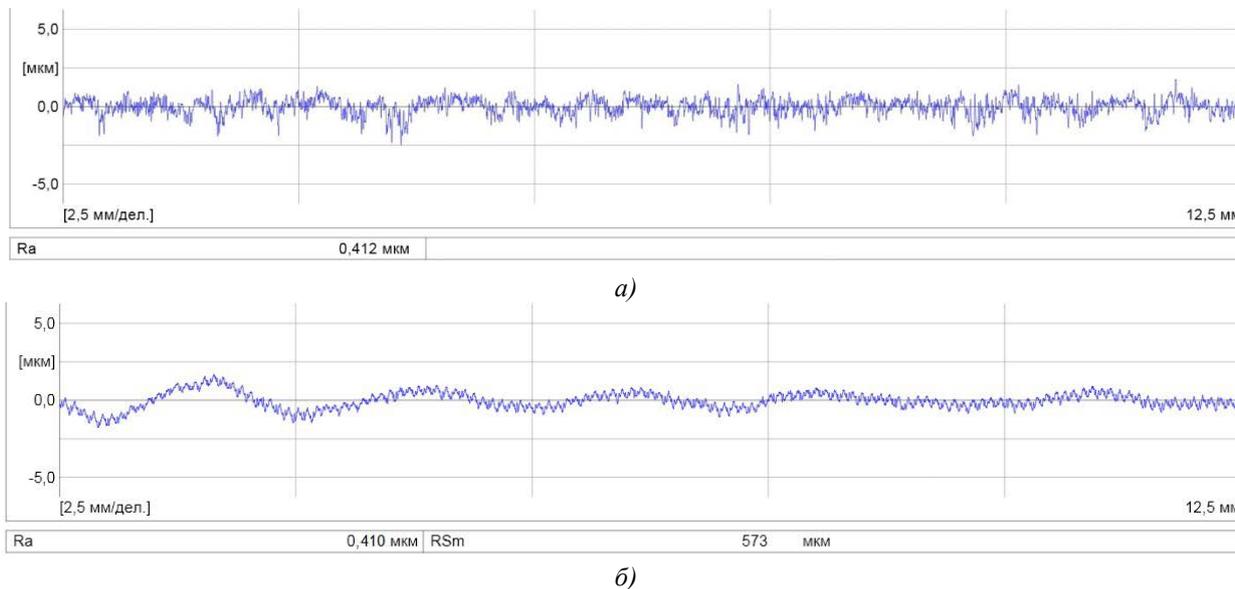


Рис. 3. Профилограммы обработанной поверхности:

а – при шлифовании ( $Ra = 0,412$  мкм); б – при фрезеровании ( $Ra = 0,410$  мкм)

При сопоставлении профилограмм для различных видов обработки следует обозначить, что при аналогичных амплитудах значений микронеровности, плотность её изменения при шлифовании в 3 раза выше, чем при фрезеровании, что объясняется меньшим размером режущей кромки. Напротив, при фрезеро-

вании наблюдается повторяющаяся угасающая волнистость микронеровности поверхности, что связано с более низкой жёсткостью системы СПИД по сравнению с шлифованием.

В обоих случаях резких изменений значений микронеровности не наблюдается, их повторяемость симметрична на всей длине уча-

стков, что свидетельствует о стабильном процессе резания и устойчивой работе системы СПИД, как при шлифовании, так и при фрезеровании. Отсюда, можно сделать вывод, что при выполнении операции торцевого фрезерования управление микронеровностью поверхности происходит не менее эффективно, как и при шлифовании, что даёт возможность в полной мере использовать данный вид обработки для финишных операций.

### Регрессионный и корреляционный анализ

После получения эмпирических данных планирования эксперимента при помощи программ Microsoft Excel, Wolfram Alpha и Statistica произведен расчёт множественной линейной регрессии. На основе расчётных данных получено итоговое уравнение математической модели шероховатости обработанной поверхности:

$$Ra = 0,206118 - 0,000741596 \cdot v + 4,19757 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 0,00416667 \cdot v \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2. \quad (6)$$

Статистическая проверка показала, что полученная математическая модель адекватна экспериментальным данным, следовательно, ее можно использовать для описания исследуемого процесса.

Полученное соотношение показывает взаимосвязь шероховатости  $Ra$  поверхности детали с такими факторами, как  $v$ ,  $S_z$  и  $t$ . На параметр оптимизации перечисленные факторы влияют непропорционально. Наибольшее влияние оказывает значение подачи на зуб, например, при её уменьшении, шероховатость поверхности так же уменьшается, а наименьшее влияние оказывает глубина резания.

Для оценки силы (тесноты) связи, а также влияния на функцию отклика, зависимой переменной  $Ra$  и независимых переменных  $v$ ,  $S_z$  и  $t$  выполнен корреляционный анализ.

Корреляционный анализ позволил количественно определить тесноту связи между двумя признаками, которая выражается величиной коэффициентов корреляции. Коэффициенты корреляции, представляя количественную характеристику, дали возможность определить силу факторных признаков при построении уравнений множественной линейной регрессии. Результаты статистических расчётов корреляционного анализа занесены в табл. 3.

### 3. Корреляционный анализ шероховатости обработанной поверхности $Ra$ (мкм)

Коэффициенты	Обозн.	Факторы		
		Скорость резания	Подача на зуб	Глубина резания
		$v(x_i)$	$S_z(x_i)$	$t(x_i)$
Коэффициент регрессии при соответствующем факторе	$a_i$	-0,000741596	4,19757	0,0687517
Среднее значение фактора	$\bar{x}_i$	92,5	0,08	0,15
Коэффициент эластичности	$\Theta_i$	-0,170	0,834	0,026
Стандартизированный коэффициент уравнения множественной регрессии	$\beta_i$	-0,068	1,423	0,036
Парный коэффициент корреляции между результативным и $i$ -ым фактором	$r_{yxi}$	-0,099	0,991	0,036
Частный коэффициент детерминации	$d_i$	0,007	1,411	0,001

Так как полученные коэффициенты корреляции  $r_{yS_z}$  и  $r_{yt}$  имеют положительные значения, что является прямой корреляционной связью между  $Ra$  и факторами  $S_z$  и  $t$ , то при их уменьшении значение  $Ra$  также уменьшается. Коэффициент корреляции  $r_{yv}$  имеет отрицательное значение, а значит обратную корреляционную связь между  $Ra$  и  $v$ , т.е. при уменьшении  $v$  значение  $Ra$  возрастает. Наибольшее приближение корреляционного отношения к единице, а значит сильную корреляционную связь и влияние на  $Ra$  имеет коэффициент

$r_{yS_z} = 0,991$  и означает, что  $Ra$  на 99,1 % зависит от изменения величины переменного фактора  $S_z$ . Наиболее низкую корреляционную связь с  $Ra$  имеет коэффициент  $r_{yt} = 0,036$ , что означает, переменный фактор  $t$  всего на 3,6 % влияет на функцию отклика  $Ra$ . В итоге получено, что наибольшую корреляционную связь и влияние на параметр оптимизации  $Ra$  оказывает взаимодействие переменных факторов  $S_z$  и  $v$ , а наименьшую связь – взаимодействие факторов  $v$  и  $t$ .

**Аналитико-графическое определение оптимальных и максимальных режимов резания**

Для анализа эмпирической математической модели шероховатости при фрезеровании, с помощью программы Wolfram Alpha произведе-

н расчёт функции отклика. При помощи последовательной подстановки в уравнение независимых переменных  $v$ ,  $S_z$  и  $t$  на основном уровне варьирования и в звёздных точках произведены необходимые вычисления.

Подставив числовое значение  $v = 71$  м/мин в уравнение регрессии получено:

$$Ra = 0,206118 - 0,000741596 \cdot 71 + 4,19757 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 0,00416667 \cdot 71 \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (7)$$

Упростив выражение (7) получено:

$$Ra = 0,153465 + 3,90174 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (8)$$

Подставив числовое значение  $v = 92,5$  м/мин в уравнение регрессии получено:

$$Ra = 0,206118 - 0,000741596 \cdot 92,5 + 4,19757 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 0,00416667 \cdot 92,5 \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (9)$$

Упростив выражение (9) получено:

$$Ra = 0,13752 + 3,81434 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (10)$$

Подставив числовое значение  $v = 114$  м/мин в уравнение регрессии получено:

$$Ra = 0,206118 - 0,000741596 \cdot 114 + 4,19757 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 0,00416667 \cdot 114 \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (11)$$

Упростив выражение (11) получено:

$$Ra = 0,121576 + 3,72257 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2 \quad (12)$$

Аналогично произведён расчёт для  $S_z = 0,007 - 0,08 - 0,153$  мм/зуб и  $t = 0,03 - 0,15 - 0,27$  мм. Результаты расчётов уравнений занесены в табл. 4.

**4. Математическая модель шероховатости поверхности при постоянной переменной на основном уровне варьирования и в звёздных точках**

Постоянные режимы резания	Математическая модель
$v = 71$ м/мин	$Ra = 0,153465 + 3,90174 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2$
$v = 92,5$ м/мин	$Ra = 0,13752 + 3,81434 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2$
$v = 114$ м/мин	$Ra = 0,121576 + 3,72257 \cdot S_z + 0,0687517 \cdot t - 5,55282 \cdot S_z^2$
$S_z = 0,007$ мм/зуб	$Ra = 0,235229 - 0,000770763 \cdot v + 0,0687517 \cdot t$
$S_z = 0,08$ мм/зуб	$Ra = 0,506561 - 0,00107493 \cdot v + 0,0687517 \cdot t$
$S_z = 0,153$ мм/зуб	$Ra = 0,71836 - 0,0013791 \cdot v + 0,0687517 \cdot t$
$t = 0,03$ мм	$Ra = 0,208181 - 0,000741596 \cdot v + 4,19757 \cdot S_z - 0,00416667 \cdot v \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2$
$t = 0,15$ мм	$Ra = 0,216431 - 0,000741596 \cdot v + 4,19757 \cdot S_z - 0,00416667 \cdot v \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2$
$t = 0,27$ мм	$Ra = 0,224681 - 0,000741596 \cdot v + 4,19757 \cdot S_z - 0,00416667 \cdot v \cdot S_z - 5,55282 \cdot S_z^2$

На основе данных таблицы с помощью компьютерной программы Mathcad v.15 [8] графически изображены на каждом графике по 3 гиперповерхности функции отклика [9] с двумя варьируемыми и одной постоянной переменной на основном уровне варьирования и в звёздных точках.

Интерпретировав гиперповерхность (рис. 4, а), изменение шероховатости выражено параболической поверхностью, где значение  $Ra$  изменяется линейно по оси  $t$  и экспонентой по оси  $S_z$ .

Наиболее значимой переменной взаимодействия является  $S_z$ , при снижении её значений шероховатость обработанной поверхности уменьшается.

Интерпретировав гиперповерхность (см. рис. 4, б), изменение шероховатости выражено прямолинейной поверхностью, где значение  $Ra$  изменяется линейно по осям  $v$  и  $t$ . Наиболее значимая переменная взаимодействия  $v$ , при повышении её значений, шероховатость обработанной поверхности уменьшается.

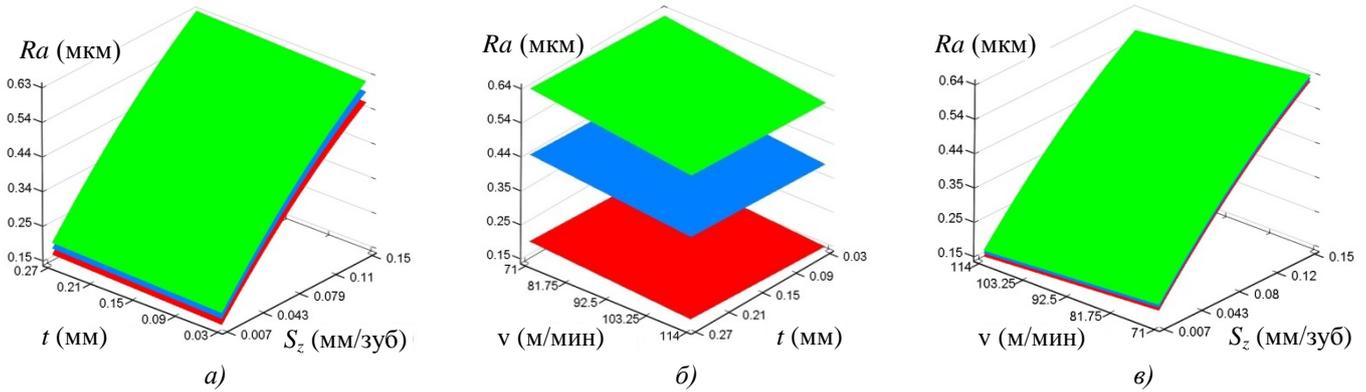


Рис. 4. Гиперповерхности функции шероховатости  $Ra$  (мкм) при постоянных переменных:  $a - v = 71-92,5-114$  м/мин;  $b - S_z = 0,007-0,08-0,153$  мм/зуб;  $c - t = 0,03-0,15-0,27$  мм

Интерпретировав гиперповерхность (см. рис. 4,  $c$ ), изменение шероховатости выражено коноидной поверхностью, где значение  $Ra$  изменяется линейно по оси  $v$  и экспонентой по оси  $S_z$ . Наиболее значимая переменная взаимодействия  $S_z$ , при её снижении и повышении  $v$ , шероховатость обработанной поверхности уменьшается.

Для графического определения микро-

ровностей поверхности, при любых значениях переменных, на горизонтальную плоскость спроецированы значения полученных гиперповерхностей шероховатости [10]. Линии уровней функции шероховатости представлены двумя варьируемыми и одной постоянной переменной:  $v$  (рис. 5,  $a$ ),  $S_z$  (рис. 5,  $b$ ) и  $t$  (рис. 5,  $c$ ) на основном уровне варьирования и в звёздных точках.

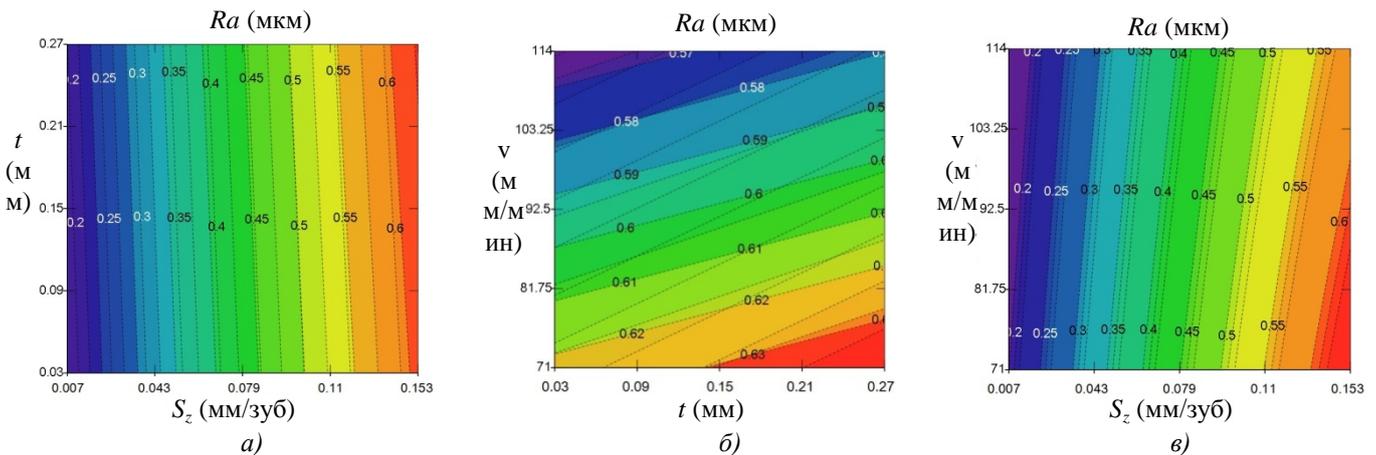


Рис. 5. Графики линий уровней функции шероховатости  $Ra$  (мкм) при постоянных переменных:  $a - v = 71-92,5-114$  м/мин;  $b - S_z = 0,007-0,08-0,153$  мм/зуб;  $c - t = 0,03-0,15-0,27$  мм

Ряд графических проекций позволил определить оптимальные значения режимов резания:  $v = 114$  м/мин,  $S_z = 0,153$  мм/зуб и  $t = 0,27$  мм, что обеспечит показатель функции  $Ra_{\text{опт}} = 0,580$  мкм. Значения режимов резания, при которых  $Ra$  находится в красном маркере, являются пограничными и приближены к максимальным, что означает недопустимость их превышения.

Так как оптимальное значение шероховатости меньше предельного  $Ra_{\text{опт}} = 0,580$  мкм  $<$   $Ra = 0,630$  мкм, то увеличение скорости съёма материала достигается путём повыше-

ния значений режимов резания. Согласно технических характеристик используемой режущей пластины, оптимальные значения переменных  $v$  и  $S_z$  уже имеют максимальные показатели, а переменная  $t$  имеет возможность увеличения. Поэтому, для повышения производительности с обеспечением заданной шероховатости обработанной поверхности, максимальное значение  $t_{\text{max}}$  определяется подстановкой в уравнение регрессии значений функции  $Ra = 0,630$  мкм и переменных  $v = 114$  м/мин и  $S_z = 0,153$  мм/зуб:

$$0,630 = 0,206118 - 0,000741596 \cdot 114 + 4,19757 \cdot 0,153 + 0,0687517 \cdot t_{\max} - 0,00416667 \cdot 114 \cdot 0,153 - 5,55282 \cdot 0,153^2. \quad (13)$$

Упростив выражение (13) получено  $t_{\max} = 1,002$  мм. Отсюда следует, что максимальная производительность обработки с обеспечением требуемого качества поверхности достигается путём работы на режимах резания:  $v = 114$  м/мин,  $S_z = 0,153$  мм/зуб и  $t = 1,0$  мм.

### Заключение

При производстве авиационной техники необходимо постоянно улучшать эксплуатационные свойства изделий, на примере внедрения в узлы деталей таких материалов, как закалённая сталь, которая требует проведения высокоточных финишных металлорежущих операций. В связи с высокой твёрдостью деталей из закалённых сталей, обеспечение требуемого качества поверхности и снижение себестоимости при её механической обработке является актуальной задачей.

Изложенный порядок выбора оборудования, режущего и измерительного инструмента показывает, что применение новых методов обработки с точным подбором инструментальных материалов, геометрических параметров и научно-обоснованных режимов резания являются главными факторами в повышении периода стойкости режущего инструмента.

Предварительные исследования показали, что при фрезеровании закалённой стали, подача на зуб фрезы должна иметь значения, не превышающих 50 % рекомендованных производителем инструмента. Так как при дальнейшем повышении подачи, в связи с циклической ударной нагрузкой на режущую кромку и высокой твёрдостью обрабатываемого слоя, происходит быстрое образование микротрещин на кромке режущей пластины с последующим выкрашиванием, разрушением и потерей её работоспособности.

Для определения технико-экономических показателей выполнен полный факторный эксперимент торцевого фрезерования. Составлена матрица уровней варьирования и планирования переменных факторов. Проведённые опыты подтвердили возможность выполнения требований конструкторской документации при обработке закалённой стали торцевым фрезерованием с применением режущего инструмента из твёрдого сплава.

С помощью профилограмм произведена сравнительная оценка микронеровностей обработанной поверхности после выполнения операций шлифования и фрезерования. Сопоставление значений подтвердило достоверность теоретических расчётов и экспериментальных данных о возможности эффективной обработки закалённой стали торцевым фрезерованием.

Для получения уравнения математической модели, эмпирические результаты испытаний шероховатости рассчитаны статистическим методом путём регрессионного и корреляционного анализа множественной линейной функции.

На основе полученного уравнения, для анализа эмпирической модели шероховатости, графически изображены гиперповерхности, которые спроецированы на графики линий уровней функции. С целью обеспечения требований, предъявляемых к процессу фрезерования исследуемой поверхности детали, при помощи графиков линий уровней, определены оптимальные режимы резания, а для повышения скорости съёма материала выполнен расчёт максимальных значений режимов резаний с учётом технической возможности режущих пластин.

Полученные теоретические и эмпирические данные подтвердили, что применение торцевого фрезерования обеспечивает необходимое качество поверхностного слоя детали, приводит к снижению тепловой и силовой напряженности процесса, а также исключает необходимость последующей абразивной обработки, такой как плоское шлифование. В связи с положительными результатами исследований, появляется возможность рекомендовать торцевое фрезерование к применению на различных машиностроительных предприятиях, для снижения себестоимости при обработке сталей высокой твёрдости.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.
2. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. / под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 273 с.

3. Косовский, В.Л. Справочник фрезеровщика. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2001. – 400 с.
4. Морозов, В.В. Фрезерный инструмент: учеб. пособие. – Владимир: ВлГУ, 2014. – 214 с.
5. Вращающиеся инструменты. Фрезерование. Sandvik Coromant: каталог. – М.: ООО «Сандвик», 2017. – 515 с.
6. Пряжникова, А.А. Обоснование рациональных геометрических параметров твердосплавных сменных многогранных пластин для чистового точения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Тула, 2014. – 203 с.
7. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Макаров, Е.Г. Инженерные расчёты в Mathcad 15: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2011. – 400 с.
9. Пепельшев, А.В. Технологическое обеспечение параметров точности и шероховатости плоских поверхностей глубоких пазов методом растрового фрезерования на станках с ЧПУ: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Пермь, 2016. – 159 с.
10. Некрасов, В.Н. Управление качеством деталей путем прогнозирования топографии обработанной поверхности с использованием имитационного моделирования на примере торцевого фрезерования: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Барнаул, 2007. – 136 с.

## REFERENCES

1. Makarov, V.F. Selection and appointment of optimal

conditions for broaching workpieces from difficult-to-machine materials. Perm: Publ. house of Perm State Technical University, 2008, 396 p.

2. Grades of steels and alloys. / A.S. Zubchenko, M.M. Koslovskov, Yu.V. Kashirsky, et al. Moscow: Mashinostroenie, 2003, (in Russian).

3. Kosovsky, V.L. Handbook of a milling cutter. Moscow: Higher School, publ. center "Academy", 2001, 400 p.

4. Morozov, V.V. Milling tool. Textbook, Vladimir: VISU, 2014, 214 p.

5. Rotating tools. Milling. Sandvik Coromant: catalog, Moscow: LLC "Sandvik", 2017, 515 p.

6. Pryazhnikova, A.A. Substantiation of reasonable geometric parameters of the carbide replaceable inserts for finish-turning operation. Diss. Ph. D, 05.02.07, Tula, 2014, 203 p.

7. Spiridonov, A.A. Planning an experiment in the study of technological processes. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 184 p.

8. Makarov, E.G. Engineering calculations in Mathcad 15, training course. St. Petersburg: Peter, 2011, 400 p.

9. Pepelyshev, A.V. Technological support of accuracy parameters and roughness of flat surfaces of deep grooves by the method of raster milling on CNC machines, Diss. Ph. D, 05.02.08, Perm, 2016, 159 p.

10. Nekrasov V.N. Quality management of parts by predicting the topography of the treated surface using simulation modeling on the example of end milling, Diss. Ph. D., 05.03.01, Barnaul, 2007, 136 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.12.2021; одобрена после рецензирования 24.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 05.12.2021; approved after reviewing 24.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

