

УДК 621.914

DOI:10.30987/2223-4608-2021-7-41-48

В.Ф. Макаров, д.т.н.

(ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29),

И.Н. Сединин, ведущий технолог

(АО «ОДК-СТАР», 614033, г. Пермь, ул. Куйбышева, д. 140а/1)

E-mail: makarovv@pstu.ru; sedininigor@rambler.ru

Эффективность применения технологии скоростного торцевого фрезерования деталей топливной аппаратуры ГТД из закалённых сталей

Приведены результаты экспериментальных исследований торцевого скоростного фрезерования ответственных деталей топливной аппаратуры управления работой современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из закалённых сталей, с целью определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 0,63$ мкм и отклонение от плоскостности не более 0,015 мм. Получены эмпирические математические модели процесса скоростного фрезерования и определены оптимальные режимы резания.

Ключевые слова: торцевое фрезерование; закалённая сталь; твёрдый сплав; отклонение от плоскостности; планирование эксперимента.

V.F. Makarov, Dr. Sc. Tech.

(FSBEI HE Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, Russia, 614990)

I.N. Sedinin, Leading Technologist

(PC "ODK-STAR", 140a/1, Kuibyshev Str., Perm, 614033)

Efficiency of technology use for high-speed end milling of hardened parts of GTE fuel equipment

There are shown results of high-speed end milling experimental researches of critical hardened steel parts in fuel control equipment of modern aircraft gas turbine engines (GTE) with the purpose of optimum cutting mode definition ensuring the roughness $Ra \leq 0.63$ mkm for the surface worked and deviation from the plane not more than 0.015 mm. The empirical mathematical models of high-speed milling are obtained and optimum cutting modes are defined.

Keywords: end milling; hardened steel; hard alloy; deviation from plane; experiment planning.

Введение

Успешные испытания и начало серийного выпуска на предприятиях РФ отечественных магистральных самолетов МС-21 и ИЛ-114, оснащенных новыми газотурбинными двигателями ПД-14 и ТВ7-117, ставят перед технологами и специалистами этих заводов серьезные задачи по обеспечению высокой конкурентоспособности новых машин на мировом рынке и в нашей стране. Это можно обеспечить путем разработки новых и совершенствования применяемых высокоэффективных технологий изготовления деталей и узлов на основе повышения производительности; качества; надежности их работы в эксплуатации; снижения затрат на производство.

На Пермских машиностроительных пред-

приятиях началась активная технологическая подготовка для серийного производства новых авиационных двигателей серии ПД-8; ПД-14; ПД 35 и др. Одним из узких мест на агрегатном предприятии АО «ОДК-Стар» является технология окончательной финишной обработки корпусных деталей агрегатов дозированной подачи топлива системы управления авиационными двигателями. Корпуса гидроагрегатов из высокоуглеродистых коррозионноустойчивых сталей типа 95X18-Ш подвергаются обязательной закалке до твердости 59...61 HRC для повышения износостойкости внутренних контактных поверхностей плунжерных переключателей. В свою очередь наружные плоские торцевые поверхности корпусов для обеспечения высокой герметичности и плотности соединения с крышками гид-

роагрегатов должны изготавливаться с шероховатостью $Ra \leq 0,63$ мкм и отклонением от плоскостности не более 0,015 мм. Применяемые для этих целей операции шлифования в условиях значительного роста производства и номенклатуры агрегатов не обеспечивают стабильно требуемые параметры обработанных плоских поверхностей. На обработанных поверхностях наблюдаются шлифовочные прижоги; трещины; включения разрушенных абразивных зерен. В результате требуется дополнительная операция притирки и доводки плоскостей абразивными пастами.

Предложено вместо операций шлифования и притирки применить операцию окончательного чистового торцевого фрезерования. При изучении результатов исследований и опыта предприятий установлено практически полное отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по выбору режущего инструмента; геометрических параметров; материала; стойкости и рациональных режимов резания процесса «твердого фрезерования». Не выявлены закономерности и взаимосвязи, отсутствуют разработки математических моделей влияния режимов и условий «твердого фрезерования» на параметры качества поверхностного слоя и точность обработки. В связи с актуальностью данной проблемы и для ее решения поставлены настоящие исследования.

Методика проведения исследований

Для выполнения исследований выбран наиболее жесткий и скоростной вертикально-фрезерный станок с ЧПУ Emcomill E600 (Австрия) (рис. 1, а) с системой числового программного управления Siemens SINUMERIK 810D. Максимальное число оборотов – 10 000 об/мин. Мощность привода – 13 кВт. Точность обработки плоскостей – не более 6 мкм.

Для прецизионного плоского фрезерования выбрана схема прямолинейного, попутного, несимметричного движения торцевой фрезы (см. рис. 1, б, в), так как данная схема движения имеет более благоприятный характер входа режущих кромок фрезы в обрабатываемую поверхность образцов. Опытные образцы подготовлены из коррозионностойкой высокоуглеродистой стали марки 95X18-III [1], закалённой до твёрдости 59...61 HRC. Размеры прямоугольных образцов 41x35x18 мм. Образцы после закалки обрабатывались по новой технологии «твердого фрезерования» торцевой фрезой на станке мод. Emcomill E600.

В качестве режущего инструмента после

предварительных испытаний различных фрез из различных материалов и геометрий выбрана наиболее рациональная торцевая фреза шведской фирмы «Sandvik Coromant» CoroMill R245-063Q22-12M с пятью сменными пластинами R245-12 T3 M-PM [2].



а)



б)

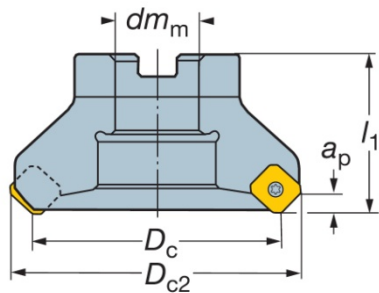


в)

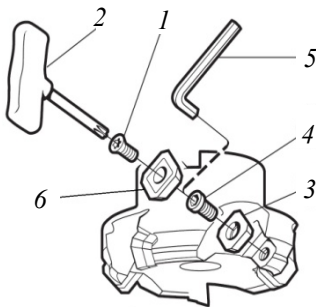
Рис. 1 а – общий вид вертикально-фрезерного станка с ЧПУ Emcomill E600; б – процесс обработки поверхности образцов на станке; в – схема движения режущего инструмента относительно образцов

Конструкция торцевой фрезы (рис. 2) обеспечивает высокую жёсткость системы креплений, стойкость к пластической деформации и плавность входа в заготовку. Корпус фрезы выполнен с большой точностью для уменьше-

ния дисбаланса и обеспечения биения режущих кромок пластин не более 0,01 мм. Фреза крепится в специальном отбалансированном патроне для скоростного резания.



а)



б)



в)

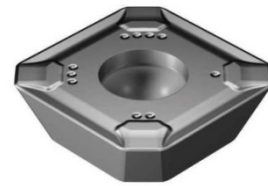
Рис. 2. Конструкция торцевой фрезы фирмы «Sandvik Coromant» CoroMill R245-063Q22-12M:

a – обозначение основных размеров; *б* – эскиз установки сборочных элементов (*1* – винт пластины; *2* – динамометрический ключ; *3* – опорная пластина; *4* – винт опорной пластины; *5* – ключ; *6* – режущая пластина); *в* – конструкция фрезы в собранном виде

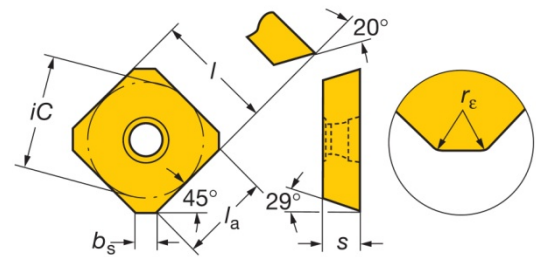
Рабочий диаметр фрезы $D_c = 63$ мм. Наружный диаметр $D_{c2} = 75,5$ мм. Угол в плане равен 45° . Осевой передний угол равен 20° . Максимальная допустимая частота вращения $n = 14\,400$ об/мин. Число зубьев 5 шт. Общая высота корпуса фрезы $l_1 = 40$ мм.

В качестве сменных неперетачиваемых режущих пластин (СМП) для выбранной фрезы после предварительных испытаний подобраны

квадратные пластины фирмы «Sandvik Coromant» R245-12 T3 M-PM из мелкозернистого твердого сплава 1010 с высоким значением сопротивления изгибу (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Общий вид (а) и обозначение основных размеров и геометрии режущей пластины «Sandvik Coromant» R245-12 T3 M-PM сплав 1010 (б)

Эти пластинки предназначены специально для скоростного фрезерования закаленных сталей. Основание пластин из твердого сплава типа BK8-OM (1010), покрытие методом PVD мультислойное – алюминитрид титана (TiAlN). Это покрытие обладает хорошим сопротивлением высокотемпературному износу, низким коэффициентом трения, т.к. наружный слой покрытия из оксида алюминия обеспечивает хорошее скольжение горячей стружки без теплопередачи и прилипания [3]. Пластинки выполнены с фаской и предназначены для прерывистого и непрерывного фрезерования закаленных сталей твердостью $HRC \geq 36$. Рекомендуется подача на зуб $S_z = 0,1 \dots 0,28$ мм/зуб и скорость резания $v = 75 \dots 110$ м/мин, что в 2 – 3 раза больше обычно применяемых скоростей фрезерования высокотвердых материалов. Радиус в углах вершины $r_\epsilon = 1,5$ мм. Ширина вершины кромки $b_s = 2$ мм. Эффективная длина режущей кромки $l_a = 10$ мм.

Отклонение от плоскостности поверхности измерялось на координатно-измерительной машине CONTURA G2 со сканирующей измерительной головкой VAST XXT и шупом с точностью 0,1 мкм. Обработка и вывод результатов измерения плоскостности реализованы на персональном компьютере с програм-

мным обеспечением Calypso v5.0.24.

Измерение шероховатости обработанной поверхности образцов проводились с помощью цифрового профилометра с USB Mahr Surf PS1. Обработка и вывод данных профилограмм выполнялись с использованием персонального компьютера с программным обеспечением ПО MarSurf PS1 Explorer v1.20-07. Визуальный контроль детали и режущих кромок пластин проводилось на стереоскопическом цифровом микроскопе «ЛОМО» МСП-1.

При проведении эксперимента обеспечивалась необходимая стойкость режущих пластин с отсутствием сколов и выкрашиваний режущих кромок. Охлаждение зоны резания проводилось обдувкой сжатым воздухом.

Высотные размеры образцов при фрезеровании выдерживались в пределах допуска $\pm 0,01$ мм во всех опытах, независимо от режимов резания, что указывает на обеспечение достаточной жёсткости системы СПИЗ.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием метода планирования полного факторного эксперимента [4, 5]. В качестве независимых переменных приняты: скорость резания v (м/мин), подача на зуб S_z (мм/зуб) и глубина резания t (мм). Составлен полный факторный эксперимент типа 2^3 . Уровни варьирования переменных факторов выбраны на основании предварительных экспериментов и представлены в матрице (табл. 1).

Одновременно с исследованием шероховатости Ra проводилось и измерение отклонения от плоскостности для нахождения функции $\Delta = f(v, S_z, t)$. Для определения коэффициентов регрессии поставлено восемь опытов и опыт № 9 с нулевым уровнем переменных,

предназначенный для дополнительной оценки возможности использования данной модели и значимости коэффициентов регрессии. Так как погрешность метода измерения неизвестна, поэтому сделано троекратное повторение каждого из восьми опытов и четырехкратное повторение опыта № 9.

1. Кодирование уровней варьирования независимых переменных

Уровни варьирования	Независимые переменные, влияющие на Ra (мкм)		
	v (м/мин)	S_z (мм/зуб)	t (мм)
Верхний +1	110	0,14	0,25
Нулевой +0	92,5	0,08	0,15
Нижний -1	75	0,02	0,05

Оценка значимости полученных регрессионных математических моделей проводилась с использованием критерия Стьюдента, однородность дисперсии оценивалась по критерию Кохрена, адекватность полученных математических моделей оценивалась по критерию Фишера [4].

Расчёт линейной регрессии проводился с использованием компьютерных программ Microsoft Excel, Wolfram Alpha и Statistica.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате анализа полученных данных по измерению шероховатости на различных вариантах режима резания (табл. 2) установлено, что на всех режимах «твердого фрезерования» обеспечивается шероховатость в пределах $Ra = 0,426 \dots 0,184$ мкм, что намного ниже верхнего предельного значения требований КД, равного $Ra \leq 0,63$ мкм.

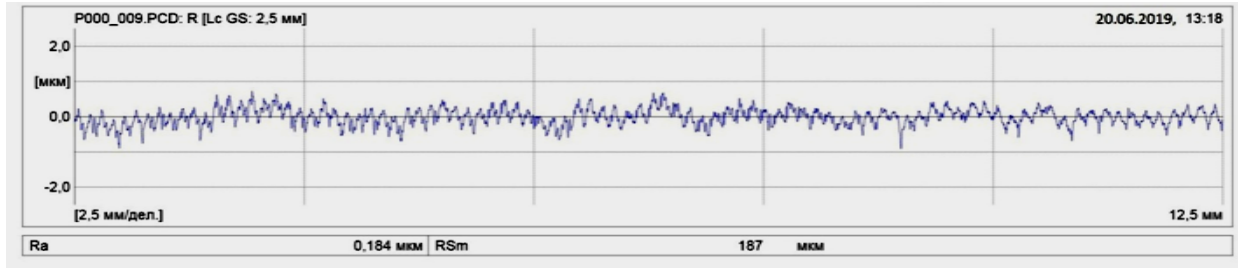
2. Результаты измерений шероховатость Ra (мкм) поверхности при «твердом фрезеровании» плоскостей на различных режимах резания

№ опыта	Числовые значения факторов			Результаты опытов, шероховатость Ra (мкм)				
	v (м/мин)	S_z (мм/зуб)	t (мм)	№ повторений				
				y^I	y^{II}	y^{III}	y^{IV}	\bar{y}_N
1	75	0,02	0,05	0,420	0,349	0,412		0,381
2	110	0,02	0,05	0,277	0,299	0,302		0,293
3	75	0,14	0,05	0,426	0,394	0,413		0,411
4	110	0,14	0,05	0,402	0,421	0,386		0,403
5	75	0,02	0,25	0,249	0,246	0,184		0,228
6	110	0,02	0,25	0,287	0,342	0,303		0,311
7	75	0,14	0,25	0,363	0,298	0,405		0,355
8	110	0,14	0,25	0,342	0,397	0,389		0,376
9	92,5	0,08	0,15	0,351	0,364	0,373	0,367	0,364

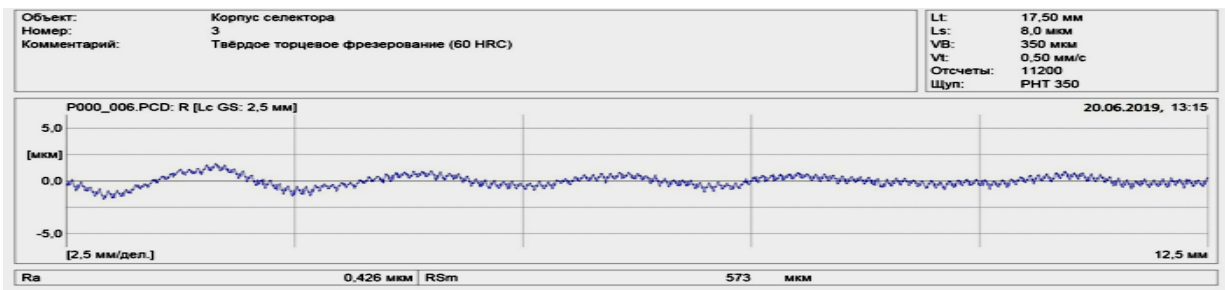
Самым производительным является опыт № 8, где получено среднее $Ra = 0,376$ мкм с режимами резания, где $v = 110$ м/мин, $Sz = 0,14$ мм/зуб и $t = 0,25$ мм.

Анализ записи профилограмм шероховатости на различных режимах фрезерования

(рис. 4) показал, что изменение высоты микронеровностей на обработанных плоскостях образцов имеет равномерное распределение без резких перепадов и пиков, что свидетельствует о стабильном процессе резания и устойчивой работе системы СПИЗ.



а)



б)

Рис. 4. Профилограммы поверхностей, обработанных на различных режимах фрезерования: а – $Ra = 0,184$ мкм (опыт № 5); б – $Ra = 0,426$ мкм (опыт № 3)

После проведения регрессионного анализа результатов экспериментов, расчета и оценки значимости коэффициентов регрессии, проведенной по t -критерию Стьюдента, позволившей определить значимые коэффициенты и

отбросить незначимые коэффициенты, получена следующая математическая модель влияния режимов фрезерования на шероховатость обработанной поверхности:

$$Ra = 0,21 - 7,4 \cdot v \cdot 10^{-4} + 4,2 \cdot Sz + 0,07 \cdot t - 4,2 \cdot v \cdot Sz \cdot 10^{-3} - 5,55 \cdot Sz^2 \quad (1)$$

Проверочный расчёт значений уравнения и экспериментальных данных показал, что абсолютное и относительное отклонение функции Ra не превышает 8,9 %, это означает хорошую сходимость результатов.

Проверка математической модели на адекватность по критерию Фишера показала, что математическое описание функции отклика уравнением регрессии адекватное.

По результатам анализа эмпирической математической модели шероховатости при фрезеровании построены графики изменения шероховатости относительно каждого из трёх независимых переменных факторов. Для этого в уравнение регрессии поочерёдно внесено числовое значение переменных на основном уровне варьирования: $v = 92,5$ м/мин,

$Sz = 0,08$ мм/зуб и $t = 0,15$ мм.

Графики зависимостей изменения шероховатости от скорости резания v , подачи Sz и глубины резания t (рис. 5) построены с помощью программы Microsoft Excel.

В результате анализа графиков установлено, что наиболее значимое влияние на шероховатость поверхности оказывает подача на зуб Sz . При увеличении Sz с 0,01 до 0,15 мм/зуб значение шероховатости обработанной поверхности Ra увеличивается с 0,185 до 0,595 мкм. С увеличением скорости резания v с 71 до 114 м/мин шероховатость снижается незначительно на 5...10 %, а изменение глубины резания t от 0,03 до 0,27 мм практически не влияет на изменение шероховатости (увеличение на 3...5 %).

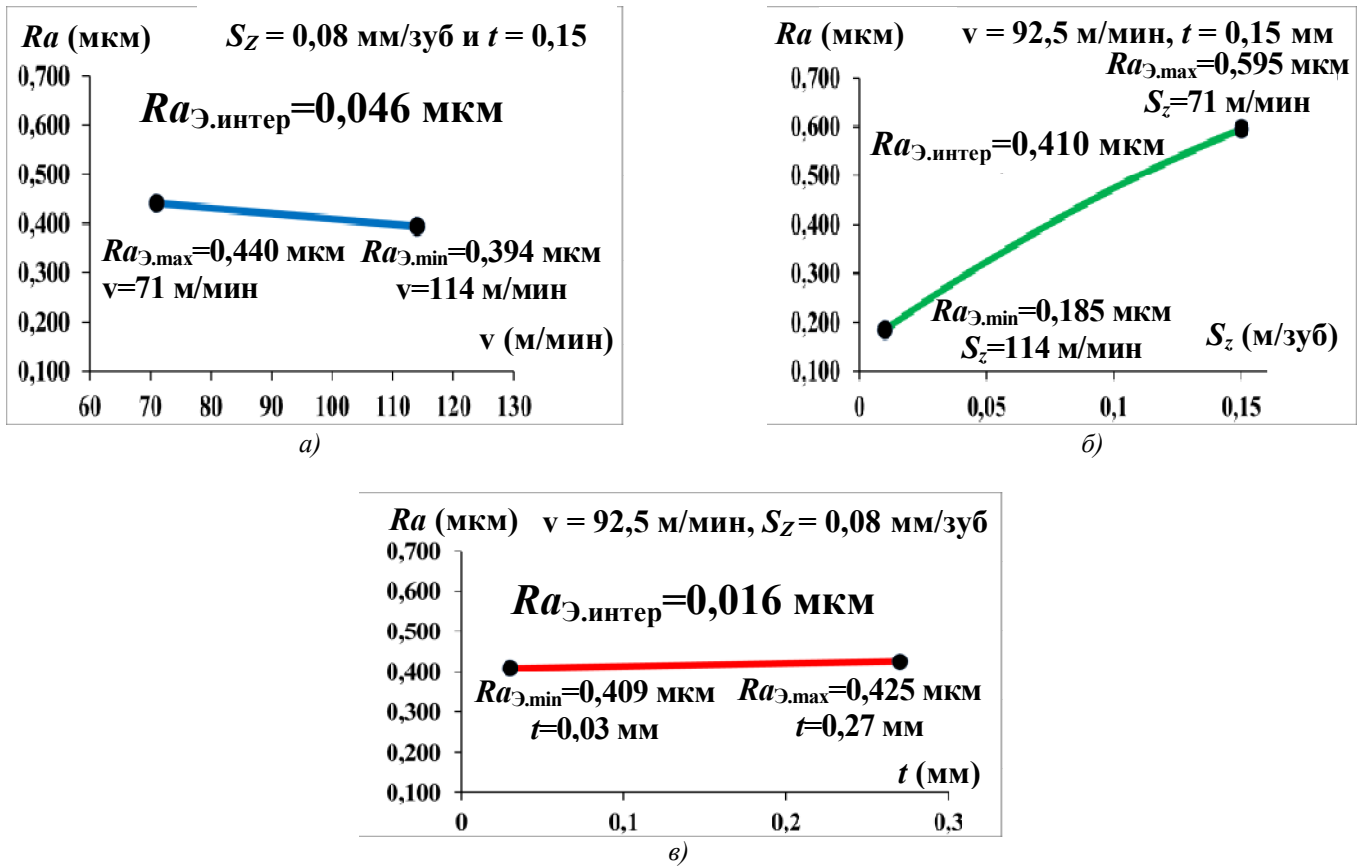


Рис. 5. Влияние скорости резания v (а), подачи на зуб S_z (б) и глубины резания t (в) на изменение шероховатости поверхности Ra при торцевом фрезеровании ($v = 92,5$ м/мин, $S_z = 0,08$ мм/зуб и $t = 0,15$ мм)

Одновременно с измерениями шероховатости проводилось измерение отклонений от плоскостности обработанных торцов образцов при «твердом фрезеровании». Результаты измерений представлены в табл. 3.

Анализ результатов измерений показал, что значения отклонений от плоскостности обработанной поверхности Δ находятся в диапазоне $0,0079 \dots 0,0256$ мм, т.е. имеют или меньшее значение, или в некоторых опытах превышают требование КД, равное $\Delta \leq 0,015$ мм. Минимальное среднее значение отклонения от пло-

скостности $0,0086$ мм получено в опыте № 2 при $v = 110$ м/мин, $S_z = 0,02$ мм/зуб и $t = 0,05$ мм. Максимальное среднее значение отклонений от плоскостности обработанной поверхности $\Delta = 0,0257$ получено в опыте № 7 с режимом резания $v = 75$ м/мин, $S_z = 0,14$ мм/зуб и $t = 0,25$ мм. Наиболее производительным оказался, так же как и в предыдущих исследованиях, опыт № 8: $v = 110$ м/мин, $S_z = 0,14$ мм/зуб и $t = 0,25$ мм, при котором обеспечивается $\Delta = 0,0136$ мм.

3. Результаты измерений отклонения от плоскостности поверхности Δ (мм) при «твердом фрезеровании» на различных режимах резания

№ опыта	Числовые значения факторов			Результаты опытов, плоскостность (мм)				
	v (м/мин)	S_z (мм/зуб)	t (мм)	№ повторений				\bar{y}_N
				y^I	y^{II}	y^{III}	y^{IV}	
1	75	0,02	0,05	0,0130	0,0142	0,0127		0,0133
2	110	0,02	0,05	0,0079	0,0098	0,0081		0,0086
3	75	0,14	0,05	0,0145	0,0129	0,0150		0,0141
4	110	0,14	0,05	0,0106	0,0132	0,0129		0,0122
5	75	0,02	0,25	0,0160	0,0148	0,0145		0,0151
6	110	0,02	0,25	0,0102	0,0124	0,0115		0,0113
7	75	0,14	0,25	0,0266	0,0259	0,0247		0,0257
8	110	0,14	0,25	0,0130	0,0115	0,0164		0,0136
9	92,5	0,08	0,15	0,0206	0,0194	0,0188	0,0201	0,0197

На основе аналогичных матриц варьирования и планирования полного факторного эксперимента 2^3 проведен регрессионный анализ влияния режимов фрезерования на величину отклонения от плоскостности и получена следующая математическая модель:

$$\Delta = 0,016 - 5,1 \cdot v \cdot 10^{-5} - 0,01 \cdot S_z - 0,04 \cdot t + 0,24 \cdot S_z^2 + 0,33 \cdot t^2$$

Полученное уравнение регрессии по аналогии с предыдущими исследованиями оценены на достоверность, воспроизводимость и адекватность математической модели. Все оценки положительные.

Для оценки влияния режимов резания на величину отклонения от плоскостности Δ при «твердом фрезеровании» закаленных сталей на основе полученной эмпирической математической модели построены аналогично предыдущим исследованиям соответствующие графики функции отклика от трёх переменных факторов скорости резания v , подачи на зуб S_z и глубины резания t (рис. 6).

Для оценки влияния режимов резания на величину отклонения от плоскостности Δ при «твердом фрезеровании» закаленных сталей на основе полученной эмпирической математической модели построены аналогично предыдущим исследованиям соответствующие графики функции отклика от трёх переменных факторов скорости резания v , подачи на зуб S_z и глубины резания t (рис. 6).

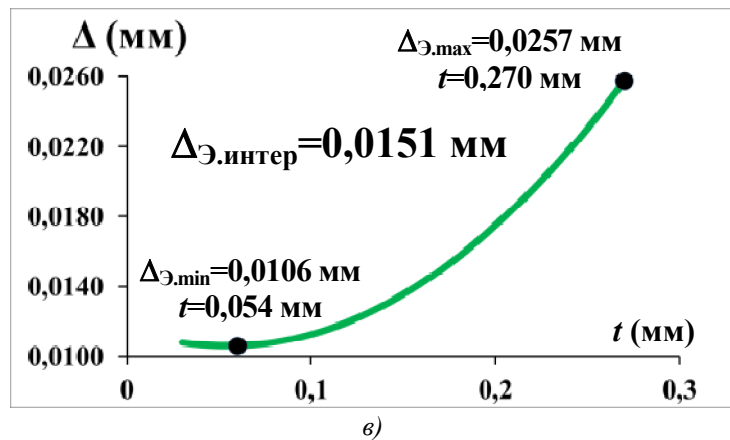
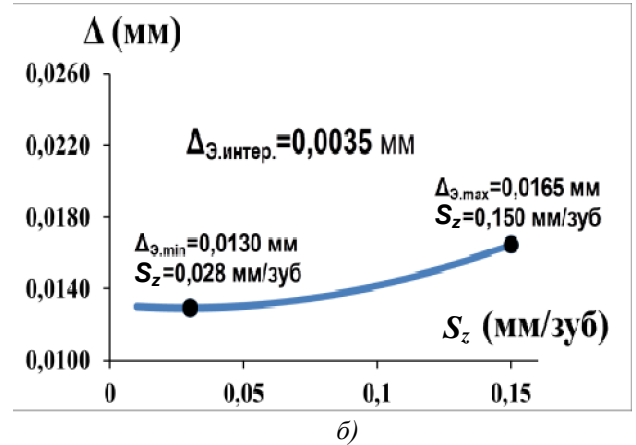
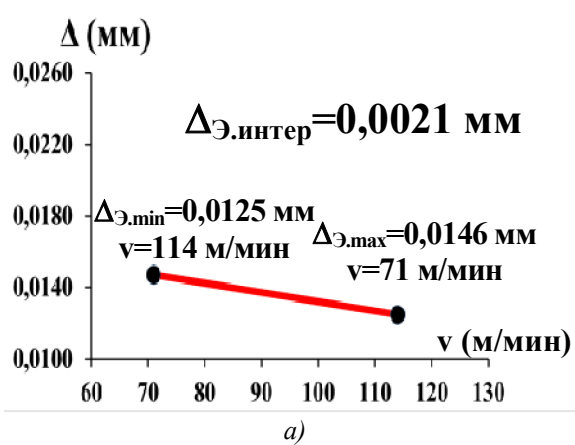


Рис. 6. Влияние скорости резания v , подачи на зуб S_z и глубины резания t на величину отклонения плоскостности поверхности Δ (мм) при «твердом фрезеровании» закаленных сталей:

а – v ; б – S_z ; в – t

В результате анализа графиков установлено, что наибольшее влияние на отклонение от плоскостности оказывает изменение глубины резания t . С увеличением t от 0,054 до 0,27 мм отклонение от плоскостности увеличивается более чем в два раза с 0,0106 до 0,0257 мм. Влияние скорости резания и подачи меньше. С увеличением скорости резания v с 71 до 114 м/мин отклонение от плоскостности Δ снижается на 15 %, а с увеличением подачи на

зуб S_z с 0,028 до 0,15 отклонение от плоскостности Δ увеличивается на 20 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований предприятию рекомендовано заменить процессы окончательного шлифования и притирки на процесс скоростного «твердого фрезерования» на оптимальном режиме резания $v = 110$ м/мин, $S_z = 0,14$ мм/зуб и $t = 0,25$ мм, при котором обеспечивается $\Delta = 0,0136$ мм и шероховатость $Ra = 0,376$ мкм и наибольшая производительность.

Выводы

1. Применение торцевого «твердого фрезерования» закаленных сталей на повышенных в 2,5 – 3 раза скоростях резания обеспечивает стабильно соответствие ответственных деталей авиационных гидроагрегатов требованиям конструкторской документации $Ra \leq 0,63$ мкм и отклонение от плоскостности не более 0,015 мм.

2. Применение твердого скоростного фрезерования закаленных сталей позволяет повысить производительность обработки в два раза, снизить тепловую и силовую напряженность процесса резания, улучшить качество обработанной поверхности и исключить необходимость последующей абразивной обработки, такой как плоское шлифование и притирка.

3. Внедрение фрезерования позволит высвободить дорогостоящее шлифовальное оборудование, снизить себестоимость изготовления детали.

4. Результаты проведенных исследований скоростного твердого фрезерования закаленных сталей рекомендуются для применения на различных машиностроительных предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубченко, А.С. Марочник сталей и сплавов, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003. – 273 с.

2. Каталог: Фрезерный инструмент. «TaeguTec LTD». – 2016. – 288 с.

3. Табаков, В.П., Смирнов, М.Ю., Циркин, А.В. Работоспособность торцевых фрез с многослойными износостойкими покрытиями: монография. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 152 с.

4. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.

5. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

REFERENCES

1. Zubchenko, A.S. *Steel and Alloy Marking*, 2-d edition. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – p. 273.

2. Catalogue: *Milling Tool*. “TaeguTec LTD”. – 2016. – p. 288.

3. Tabakov, V.P., Smirnov, M.Yu., Tsirkin, A.V. *Working Capacity of End Milling Cutters with Multi-layer Wear-resistant Coatings*: monograph. – Uliyanovsk: UISTU, 2005. – p. 152.

4. Makarov, V.F. *Choice and Purpose of Optimum Conditions for Hard-to-Work Billet Broaching*. Perm: Perm State Technical University Publishers, 2008. – p. 396.

5. Katsev, P.G. *Statistical Methods of Cutter Investigation*. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – p. 231.

Рецензент д.т.н.
Александр Иванович Болдырев

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-910-293-62-96.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 16.07.2021. Выход в свет 30.07.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"

