

Модульные инструментальные наладки для микрообработки

А. Р. Маслов

Приведены характерные особенности модульных инструментальных систем для фрезерования 3D-поверхностей малой площади.

Ключевые слова:

модульная инструментальная система, микрообработка, фрезерование, 3D-поверхность

УДК 621.09.034 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.66.72

Особенности микрообработки

Темпы и уровень развития таких наукоемких отраслей промышленности как микроэлектроника, медицина и приборостроение требуют развития технологий микрообработки, позволяющих изготавливать все более миниатюрные детали.

Рынок микрообработки за последние несколько лет существенно расширился. Растет спрос не только на обработку миниатюрных деталей, но и на обработку мелких и сложных участков на больших деталях. В этой области наиболее активны электронная и медицинская отрасли.

В микрообработке заинтересованы и такие отрасли, где требуются небольшие детали крепления, фитинги, сенсоры, различные устройства контроля и регулирования потоков. В автомобилестроении небольшие изделия требуются для создания устройств управления и соблюдения мер безопасности. К ним относятся маленькие двигатели сервоприводных компонентов, миниатюрные инжекторы топлива и устройства их контроля.

Наравне с лазерной, электрохимической и электроэрозионной микрообработкой, широкое распространение получила микрообработка резанием, которая исключает ограничения, накладываемые физико-химическими процессами. В частности, фрезерованием возможно обрабатывать 3D-поверхности сложной геометрической формы на диэлектриках.

При микрообработке резанием необходимо решать проблему обеспечения надежности из-за низкой стойкости режущего инструмента (РИ). Существующее многообразие используемого вспомогательного инструмента и РИ усложняет создание и внедрение систем обеспечения надежности.

Для решения аналогичных проблем при обычной обработке резанием используют системный подход,

позволяющий комплексно учитывать условия, в которых предполагается эксплуатировать модульные инструментальные наладки (МИН). Создание МИН для микрообработки также требует перехода на качественно новый уровень развития инструментального обеспечения.

Для построения МИН требуется создать совокупность типоразмерных рядов вспомогательного инструмента (ВИ) для базирования и закрепления малогабаритного РИ с целью базировать и закреплять полученные сборки «режущий микроинструмент-ВИ» на станках, обеспечивающую выполнение технических и экономических требований эффективной микрообработки [1].

МИН для микрообработки имеют ряд особенностей:

- диаметры рабочей части используемого режущего инструмента находятся в интервале 0,2...6,0 мм;
- сборки инструмента эксплуатируются при частотах вращения шпинделя до 50 000 мин⁻¹;
- скорости микрорезания инструментом диаметром менее 1 мм не превышают 160 м/мин;
- обработка особо миниатюрных деталей выполняется без подачи СОЖ.

Система критериев оценки качества МИН для микрообработки

К МИН, предназначенным для микрообработки, предъявляются повышенные требования:

- для обработки с высокими частотами вращения требуется виброустойчивый ВИ;
- балансировка вращающегося инструмента при частотах вращения свыше 25 000 мин⁻¹ должна выполняться с точностью класса G2.5 по ИСО;
- требуемая точность закрепления осевого инструмента (биение контрольной оправки) – не более 0,005 мкм на вылете 25 мм;

- уменьшение массы МИН путем применения легких сплавов для их базисных деталей;
- стабилизация и компенсация центробежных сил в механизмах закрепления режущих элементов.

Одним из критериев МИН является контактная жесткость соединений их деталей. Упругие перемещения в стыках соединений зависят от большого числа факторов: шероховатости поверхности, отклонений от правильной геометрической формы, распределения давления по площади и др. При одних и тех же условиях нагружения и размерах стыков они могут изменяться в значительных пределах. Сближения в местах контакта при больших номинальных площадях являются следствием деформирования микро- и макровыступов поверхности. Действительная площадь контакта во много раз меньше номинальной из-за шероховатости поверхности.

В процессе микрообработки в результате упругих, контактных и тепловых деформаций деталей МИН и их износа под влиянием параметров процесса резания нарастает погрешность базирования. Поэтому материал деталей МИН выбирают исходя из воздействий на базовые поверхности деталей, обусловленных многократной нагрузкой соединений, вызывающих изнашивание поверхностей и последующее снижение точности базирования и установки режущего микроинструмента.

При фрезеровании микроинструментом с цилиндрическим хвостовиком основными нагрузками на МИН являются: *a* – момент силы резания $M_{кр}$; *б* – осевая сила $P_{ос}$; *в* – радиальная сила P_p (рис. 1). Кроме того, низкая жесткость МИН на кручение и изгиб влияет на виброустойчивость технологической системы в процессе резания, увеличивая шероховатость обработанной поверхности [2, 5].

Условия отсутствия проскальзывания инструмента вокруг оси инструмента:

$$R_1 \frac{d}{1} > M_{кр} \quad (1)$$

где $R_1 = T \cdot \mu_1$.

Необходимая сила закрепления [2]:

$$T = \frac{2K_{зап} \cdot M_{кр}}{\mu_1 \cdot d}, \quad (2)$$

где $K_{зап}$ – коэффициент запаса для обеспечения надежности закрепления; μ_1 – коэффициент трения между поверхностями зажимных элементов и хвостовика инструмента при прокручивании.

Под действием радиальной силы резания P_p на вылете l_p происходит перемещение y за счет изгиба консольной части инструмента и поворота за счет контактных деформаций в стыках оси инструмента на угол $\theta_{и}$, определяющих радиальную жесткость сборки, а под действием крутящего момента $M_{кр}$ происходит упругое скручивание на угол $\theta_{к}$, определяющее крутильную жесткость сборки.

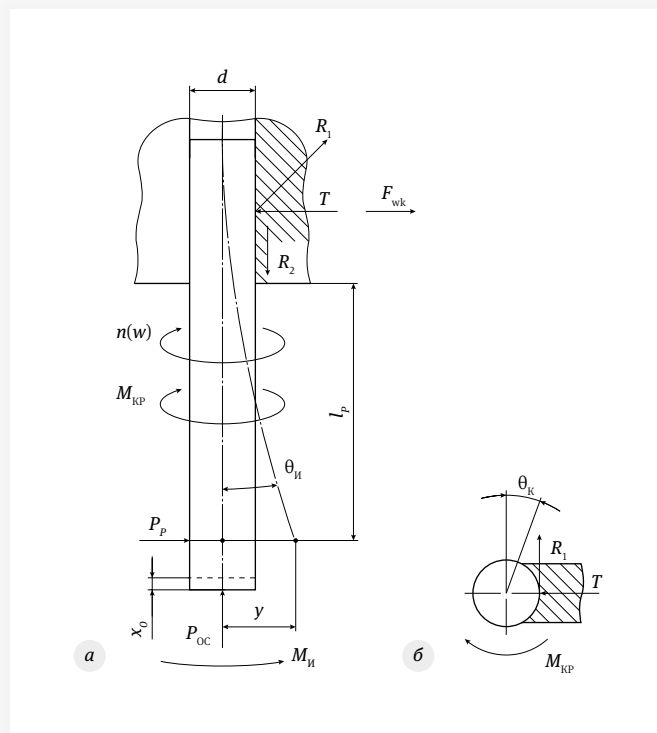


Рис. 1. Схема действия сил и соответствующих перемещений в продольном (а) и поперечном (б) сечениях МИН: d – диаметр хвостовика инструмента; R_1 – тангенциальная составляющая реакции от силы закрепления; R_2 – осевая составляющая реакции от силы зажима; $M_{кр}$ – крутящий момент силы резания; $P_{ос}$ – осевая сила резания, x_0 – осевое перемещение

При вращении сборок «РИ – ВИ» возникают центробежные силы F_{wk} , действующие на зажимные элементы в направлении, противоположном силе T , что снижает ее на величину, равную или пропорциональную центробежной силе:

$$F_{wk} = mw^2R, \quad (3)$$

где m – масса зажимного элемента; $w = \frac{\pi n}{10}$ – частота вращения сборки, рад; n – частота вращения сборки, мин⁻¹; R_k – расстояние от оси вращения инструмента до центра масс зажимного элемента.

МИН должны обеспечивать противодействие силам резания и центробежной силе при вращении сборки с высокой частотой. Поэтому необходима динамическая балансировка сборок, обусловленная остаточным дисбалансом в результате смещения центров масс отдельных частей инструмента относительно его оси вращения. Для проведения динамической балансировки сборок требуется специальное оборудование, ориентированное на двухплоскостную балансировку.

Обобщение аналитических исследований [2–6] позволило выявить следующие основные критерии оценки МИН, наиболее полно отвечающие требованиям повышения производительности микрообработки резанием:

- шероховатость обрабатываемых поверхностей;
- динамическая податливость сборки;
- величина дисбаланса при частоте вращения сборки $25\,000\text{ мин}^{-1}$;
- габариты сборки.

Экспериментальные исследования

Исследовали соответствие различных МИН выявленным критериям. Для этого были проведены испытания типовых МИН на 5-координатном высокоскоростном станке Roeders RXP 300 (рис. 2, 3) с шпинделем MEYRAT MHF-80, обеспечивающим максимальную частоту вращения $50\,000\text{ мин}^{-1}$ для высокоскоростной высокоточной обработки деталей из различных материалов.

Фрезеровали пазы в заготовках из алюминиевого сплава В95Т твердосплавными 4-зубыми концевыми фрезами с нанопокрытием, длиной рабочей части 13 мм и цилиндрическими хвостовиками диаметром 3,15 и 6 мм, предназначенными для высокопроизводительного фрезерования цветных металлов. Исследовали МИН с наиболее часто применяемыми зажимными патронами (рис. 4).

Устанавливали зависимости шероховатости обработанной поверхности от глубины резания. Испытания МИН с вылетом от торца шпинделя равным 95 мм проводили на частоте вращения $30\,000\text{ мин}^{-1}$ (скорость резания 94 м/мин), при подаче 0,02 мм/зуб со скоростью подачи 4800 мм/мин с шириной обрабатываемой поверхности 6 мм. При обработке в течение первых 10 мин МИН с цанговым патроном при глубине резания более 2,3 мм не обеспечивала заданную шероховатость $Ra\ 1,25$. МИН на базе



Рис. 3. Зона резания станка Roeders RXP 300



Рис. 2. Станок Roeders RXP 300



Рис. 4. Цанговый патрон (слева) и термопатрон

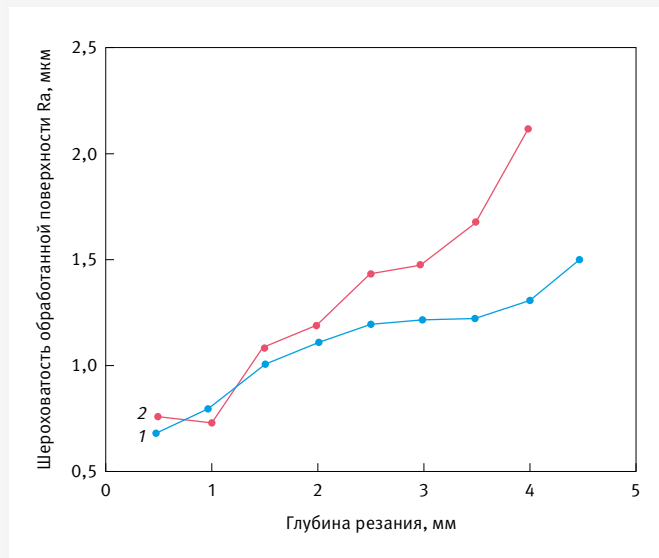


Рис. 5. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от глубины резания: 1 – термопатрон; 2 – цанговый патрон

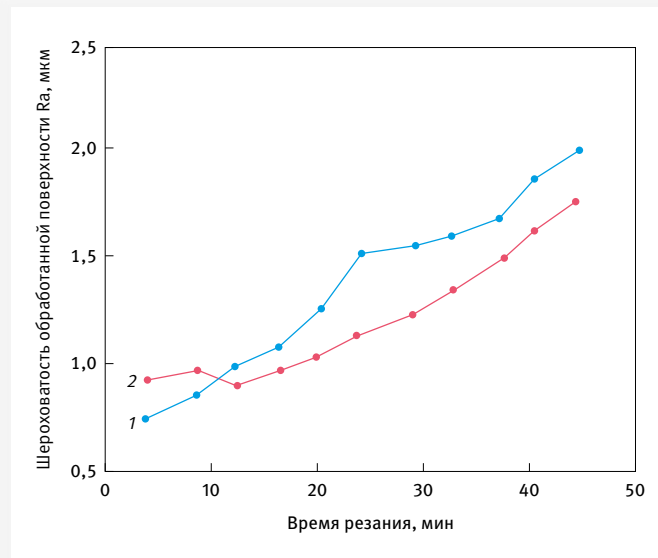


Рис. 6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от времени резания: 1 – термопатрон; 2 – цанговый патрон

термопатрона, при тех же условиях, обеспечивала обработку поверхности с шероховатостью Ra 1,25 при глубинах резания до 3,8 мм (рис. 5).

Проводили испытания МИН для установления зависимости шероховатости обработанной поверхности от времени резания. Во время испытаний в МИН использовали новые фрезы в состоянии поставки, которыми вели обработку с глубиной резания 1 мм. Было установлено, что МИН с цанговым патроном позволяет работать, обеспечивая заданную шероховатость поверхности, в 1,5 раза больше, чем в случае сборки на базе термопатрона (рис. 6). Это может быть объяснено тем, что по мере нарастания износа фрез частота вибраций технологической системы смещается в диапазон, в котором цанговый патрон лучше демпфирует вибрации, чем термопатрон.

При микрообработке оценка динамической податливости МИН может быть оценена по косвенным признакам, путем измерения значений виброускорений [3–6]. Виброускорения измеряли с помощью двух акселерометров, установленных на столе станка Roeders мод. RXP 300 по координатным осям X и Y в горизонтальной плоскости.

В табл. 1 приведены результаты замеров эффективных значений виброускорений в разных частотных диапазонах при одинаковых условиях фрезерования концевой фрезой диаметром 6 мм, закрепленной в патронах (см. рис. 4).

Имеющиеся конструктивные отличия приводят к различию динамической податливости МИН, что является основной причиной разброса среднеквадратичных значений виброускорений, указанных в табл. 1. В области частот до 1 кГц уровень этих значений, особенно по оси Y, при фрезеровании с использованием цангового патрона выше, чем при использовании термопатрона.

Спектры динамической податливости для разных МИН получали путем нанесения тарированных ударов динамометрическим молотком. Исследования динамических характеристик (спектры получены в наиболее податливых радиальных направлениях) показали, что оба патрона обладают анизотропией по отношению к направлению импульсов (рис. 7). Цанговый патрон, при более низкой собственной частоте (первый спектральный максимум), в области высоких частот имеет демпфирующую способность выше, чем у термопатрона.

Таблица 1. Среднеквадратические значения виброускорений, м/с²

Управляемая ось станка	Вид вспомогательного инструмента	Все частоты до 1 кГц	Октавные полосы со средней частотой, кГц			
			0,5	1,0	2,0	4,0
X	Цанговый патрон	0,36	0,02	0,066	0,24	0,29
		0,27	0,022	0,062	0,4	0,35
X	Термопатрон	0,32	0,04	0,052	0,27	0,2
		0,15	0,046	0,059	0,4	0,28

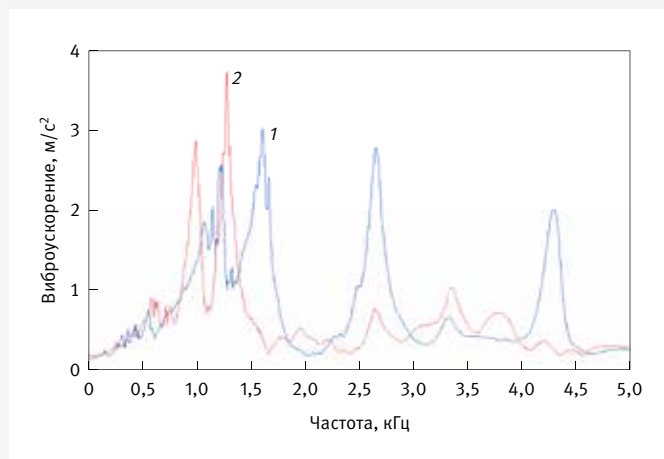


Рис. 7. Характеристики динамической податливости ВИ:

1 – термопатрон; 2 – цанговый патрон

Выявляли преимущества различных МИН по критерию остаточного дисбаланса при закреплении концевых фрез диаметром 6 мм в зажимных патронах по табл. 2. Измерение остаточного дисбаланса сборок проводили на балансировочной машине фирмы Haimer (Германия) с чувствительностью по наименьшему дисбалансу – 1 г·мм.

В табл. 3 приведены сведения о балансируемых МИН, а в табл. 4 – результаты измерений.

Эксперименты показали, что у различных МИН имеет-ся, помимо начального дисбаланса, большой разброс результатов балансировки, который может быть устранен за счет ряда конструктивных решений [7, 8].

По критерию наименьших габаритов МИН следует отметить явное преимущество МИН на базе термопатронов по сравнению с другими зажимными патронами.

Исследовали силы резания при фрезеровании заготовок из титанового сплава BT-20. Снятие динамометрической информации проводилось с помощью портативной

Таблица 2. Экспериментальные МИН с хвостовиками HSK-A63 по DIN 69893

№ п/п	Зажимной патрон	Предельная частота вращения, мин ⁻¹	Биение контрольной оправки, мм
1	Цанговый	25 000	0,01
2	Гидравлический	25 000	0,005
3	С боковым прижимом винтами	20 000	0,02
4	Термопатрон	25 000	0,003

ЭВМ и программы DynoWare, специально предназначенной для работы с усилителем-преобразователем заряда Kistler 5070A, подключенным к динамометру.

Для обработки динамометрии применялся программный пакет автоматизации инженерных расчетов SciLab версии 5.3.3, для которого была разработана соответствующая программа со следующими возможностями:

- фильтрация данных с помощью фильтров НЧ и ВЧ, реализованных на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ);
- поворот измеренных составляющих силы резания на произвольный угол в плоскости стола динамометра, а также инвертирование значений по осям;
- вычисление спектра и представление его на графиках как в 2D-виде «Частота – Амплитуда», так и в 3D-виде, показывающем также изменение во времени;
- вычисление среднеквадратичного значения (СКЗ) амплитуды для произвольного набора частотных диапазонов с отображением на графике в виде «СКЗ – Время».

Для идентификации математических моделей и оптимизации режима обработки была применена программа, также разработанная на основе SciLab.

Для повышения достоверности результатов и определения частоты вращения шпинделя, обеспечивающей максимальную динамическую жесткость технологической системы, были проведены измерения АЧХ стола динамометра и шпинделя с применением динамометрического молотка и двух акселерометров, установленных перпендикулярно в плоскости стола динамометра [9]. На основе исследований максимумов податливости для стола динамометра и для шпинделя было установлено значение зубцовой частоты, равной 367 Гц, достаточно удаленной от измеренных частот максимумов податливости.

Условия экспериментов по выявлению динамических характеристик МИН и зависимостей шероховатости обработанных поверхностей заготовок приведены в табл. 5.

Таблица 3. Виды, размеры и масса балансируемых МИН

Зажимной патрон	Диаметр зажимной части, мм	Вылет МИН от торца шпинделя, мм	Вылет фрезы из ВИ	Масса, г
Цанговый	32	70	30	470
Гидравлический	40	90	26	1 180
С боковым прижимом винтами	40	68	22	920
Термопатрон	32	70	25	430

Таблица 4. Измерения дисбаланса МИН и достигаемый класс точности дисбаланса

Зажимной патрон	Среднее значение дисбаланса (в г · мм) при частоте вращения, мин ⁻¹		Определение класса точности при настройке балансировочной машины на частоте вращения 700 мин ⁻¹			
			G2,5		G6,3	
			Частота вращения, мин ⁻¹			
	15 000	24 000	15 000	24 000	15 000	24 000
Достигаемый класс точности балансировки						
Цанговый	6,29	10,06	3,96	2,22	6,90	4,06
Гидравлический	5,43	8,69	2,53	1,58	6,32	3,95
С боковым прижимом винтами	8,44	13,50	3,45	2,15	8,62	5,39
Термопатрон	4,27	8,43	2,20	1,37	5,49	3,43

В процессе фрезерования измеряли составляющие силы резания, а также ВА-сигнал в плоскости стола динамометра. Динамометрические данные сохранялись в формате, поддерживаемом программным пакетом автоматизации инженерных расчетов SciLab, при этом дополнительная обработка встроенными в программу DupoWare средствами не проводилась. Частота дискретизации усилителя-преобразователя заряда динамометра составляла 20 кГц, что обеспечило разрешение 54 измерения/зуб фрезы и достаточные условия для покрытия всего диапазона частот, регистрируемого датчиками динамометра, диапазоном частот спектра, рассчитываемым с помощью БПФ в программе обработки данных.

Результаты динамометрии показали, что максимальные значения составляющих сил резания для обоих типов патронов примерно равны и соответствуют опытам для сборок с максимальным вылетом фрез из патронов и максимальной подачей. Также наблюдались более высокие вибрации цангового патрона на оборотной частоте, что связано с более сложной структурой взаимодействия входящих в него элементов конструкции и меньшей динамической жесткостью. На спектре цангового патрона, полученном обработкой динамометрии, ярко выражены множественные гармоники оборотной частоты, которые на спектре термопатрона практически отсутствуют, результаты измерения сил резания сведены в табл. 6.

Более точный анализ колебаний виброакустическим методом показал, что амплитуда колебаний цангового

патрона существенно (в десятки раз) выше амплитуды колебаний термопатрона, причем в спектре цангового патрона больше выделяется зубцовая частота и множественные гармоники оборотной.

Повышенные вибрации инструмента являются причиной повышения шероховатости обработанной поверхности. Было спрогнозировано, что дляборок инструмента на базе цангового патрона шероховатость обработанной поверхности должна быть больше, чем дляборок на базе термопатрона, что подтвердилось соответствующими измерениями шероховатости поверхностей дна каждого уступа. Для измерения шероховатости обработанных поверхностей применяли универсальный профилограф-профилометр фирмы Taylor Hobson модели Talysurf.

Таблица 5. Условия проведения эксперимента

№ опыта	Зажимной патрон	Вылет режущего инструмента, мм	Режимы резания				
			n, мин ⁻¹	S, мм/мин	t, мм	B, мм	СОЖ
1	Цанговый	30	5500	100	4	3	+
2				125			
3	Термопатрон	18	18	100	4	3	+
4				125			
5	Цанговый	18	18	100	4	3	+
6				125			
7	Термопатрон	18	18	100	4	3	+
8				125			

Таблица 6. Результаты измерения сил резания

Зажимной патрон	Параметр	Составляющая силы резания, Н		
		P_h	P_v	P_z
Цанговый	Максимальное значение	133	96	31
	Амплитуда оборотной частоты (92 Гц)	18	14	9
	Амплитуда зубцовой частоты (367 Гц)	26	24	11
Термопатрон	Максимальное значение	140	112	27
	Амплитуда оборотной частоты (92 Гц)	12	9	7
	Амплитуда зубцовой частоты (367 Гц)	30	22	9

Обработка полученных результатов измерений шероховатости обработанных поверхностей позволила получить следующие математические модели:

- для цангового патрона: $Ra = 1 \cdot 10^{-7} \cdot L^{1,465} \cdot S^{1,475}$;
- для термопатрона: $Ra = 1,24 \cdot 10^{-5} \cdot L^{1,296} \cdot S^{0,673}$,

где Ra – значение шероховатости обработанной поверхности, мкм; L – величина вылета фрезы относительно торца шпинделя, мм; S – величина скорости подачи, мм/мин.

В графическом виде модели представлены на рис. 8, который показывает, что для всего диапазона исследуемых вылетов сборка на базе термопатрона обеспечивает меньшую

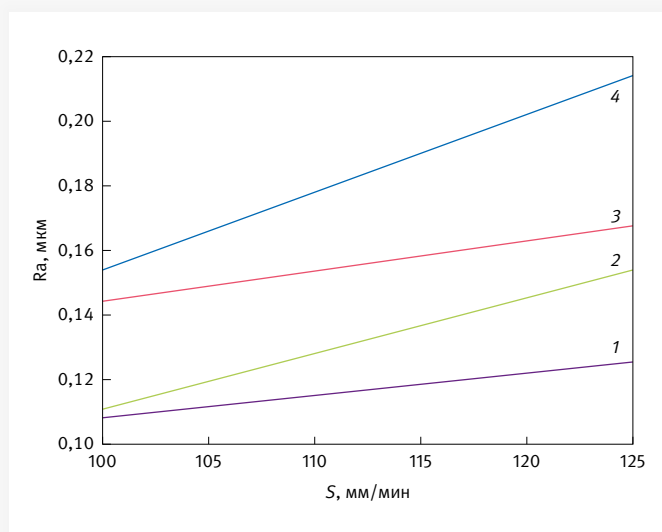


Рис. 8. Зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи для МИН с вылетом 70 мм с цанговым патроном (ЦП) и термопатроном (ТП): 1 – ТП, вылет фрезы 18 мм; 2 – ЦП, вылет фрезы 18 мм; 3 – ТП, вылет фрезы 30 мм; 4 – ЦП, вылет фрезы 30 мм

шероховатость обработанной поверхности, по сравнению со сборкой на базе цангового патрона.

На основании полученных моделей были вычислены оптимальные значения подач, обеспечивающие максимальную производительность в зависимости от вылета и типа патрона при установленной шероховатости обработанной поверхности.

Важно, что, имея более высокие эксплуатационные характеристики, термопатрон обладает также предельной простотой конструкции, обеспечивающей стабильно высокую сбалансированность сборок, а также имеет минимально возможный наружный диаметр.

Литература

1. Hesselbach J., Raatz A., Wrege J., Herrmann H., Weule H., Buchholz C., Tritschler H., Knoll M., Elsner J., Klocke F., Weck M., Bodenhausen J., Klitzing A. MikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. Werkstattstechnik, vol. 93 (2003), pp. 34–46.
2. Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Черкасова Н. Ю. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 3. С. 44–48.
3. Григорьев С. Н., Борисов А. А., Маслов А. Р. Инструментальное обеспечение микрообработки // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 12. С. 32–37.
4. Маслов А. Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник. М.: Машиностроение, 2006. 336 с.
5. Кузнецов Ю. Н., Волошин В. Н., Неделчева П. М. и др. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием / Под ред. Ю. Н. Кузнецова. Киев: Изд-во «ЗМОК», 2010. 446 с.
6. Sharif S., Mohrni A. S., Noordin M. Y., Vencatesh V. C. Optimization of surface roughness prediction model in end milling titanium alloy (Ti-6Al-4V). Proceeding of ICOMAST, 2006, pp. 55–59.
7. Oktema H., Erzurumlu T., Kurtaran H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. Journal of Materials Processing Technology, 2005, vol. 170, pp. 11–16.
8. Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Козочкин М. П. и др. Диагностика автоматизированного производства / Под ред. С. Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
9. Борисов А. А. Динамические характеристики технологической системы при фрезеровании малогабаритным инструментом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 3. С. 55–58.

Автор

Маслов Андрей Руффович – доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н. Э. Баумана



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А.Р. Маслов

Технологии производства микродеталей

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 236 с.
ISBN 978-5-94836-664-7

Цена 1188 руб.

В книге представлены основные элементы технологии микрообработки (Microproduction) деталей машиностроительного производства, медицинской техники и инструментария, радиотехники, электроники и оптических систем.

Дано описание основных видов оборудования с использованием многоцелевых станков с ЧПУ для обработки резанием заготовок микродеталей из основных применяемых конструкционных материалов. Даны сведения о получении микроизделий и малоразмерных деталей литьем и методами аддитивных технологий.

Приведены сведения об инструментарии и методах диагностирования состояния технологических процессов микрообработки. Дано представление о современных способах повышения надежности технологических систем путем нанесения износостойких и антифрикционных покрытий методами вакуумно-плазменных технологий.

Приведены сведения об инструментальных системах и средствах инструментального обеспечения, повышающих эффективность микрообработки. Дан обзор средств измерения микродеталей и способов исследования поверхностных структур в наноразмерном диапазоне.

Пособие предназначено для будущих инженеров, обучающихся по направлению подготовки 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» и будущих магистров науки и технологий, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphaera.ru