

**Ключевые слова:**

инструментальная система, микрообработка, фрезерование, 3D-поверхность

Keywords:

tooling system, micromachining, milling, 3D surface

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРООБРАБОТКИ

Александр БОРИСОВ, Андрей МАСЛОВ

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

Описана инструментальная система, созданная в МГТУ «СТАНКИН».

Describes the characteristics of the development of tooling systems for milling of 3D surfaces of the small square. Describes the tooling system created in MSTU STANKIN.

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 отрасли, где требуются небольшие детали крепления, фитинги, сенсоры, различные устройства контроля и регулирования потоков. В автомобилестроении небольшие изделия нужны для создания удобств управления и соблюдения мер безопасности. К ним относятся маленькие двигатели сервоприводных компонентов, миниатюрные устройства для инъекции топлива и ее контроля.

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

При микрообработке резанием необходимо решать проблему обеспечения надежности из-за низкой стойкости инструмента. Существующее многообразие используемого вспомогательного и

режущего инструмента усложняет создание и внедрение систем обеспечения надежности.

Для решения аналогичных проблем при обычной обработке резанием используют системный подход, позволяющий создавать универсальные инструментальные системы (ИС), комплексно учитывающие условия, в которых предполагается эксплуатировать ИС. Создание ИС необходимо для перехода на качественно новый уровень развития специализированного инструментального обеспечения.

Для построения ИС требуется создать совокупность типоразмерных рядов вспомогательного инструмента (ВИ) для базирования и закрепления режущего инструмента и полученной сборки «режущий инструмент-ВИ» (далее – «сборки») на станках, обеспечивающую выполнение технических и экономических требований эффективной микрообработки [1].

ИС для микрообработки 3D-поверхностей 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 менее 1 мм не превышают 160 м/мин;
- балансировка сборок при частотах вращения свыше 25 000 мин⁻¹ с точностью класса G2.5 по ИСО;
- точность закрепления инструмента с биением менее 0,005 мкм на вылете 25 мм.

→ обработка особо миниатюрных деталей выполняется всухую, поскольку одна капля СОЖ может в 100 раз превышать диаметр используемого инструмента.

СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ

Для обработки с высокими частотами вращения требуется жесткий виброустойчивый ВИ. К сборкам, предназначенным для микрообработки, предъявляются повышенные (по сравнению с традиционной обработкой) требования по точности и качеству обработки. Особые требования относятся к вращающему инструменту:

- минимизация дисбаланса;
- уменьшение массы благодаря применению легких сплавов для его корпуса;
- достижение высокой точности расположения базирующих поверхностей корпуса относительно оси вращения инструмента;
- стабилизация сил закрепления режущих элементов.

Один из критериев качества сборки — контактная жесткость соединений. Упругие перемещения в стыках соединений зависят от большого числа факторов (шероховатость поверхности, отклонения от правильной геометрической формы, распределение 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, тепловых деформаций ВИ и износа его элементов под влиянием процесса резания нарастает погрешность базирования. Поэтому, исходя из требований к базовым поверхностям, обусловленных многократной нагрузкой соединений из-за частой сборки и разборки, вызывающих изнашивание поверхностей и последующее снижение точности базирования инструмента, выбирают материал ВИ.

При фрезеровании микроинструментом с цилиндрическим хвостовиком основными нагрузками на ВИ являются: момент силы резания $M_{кр}$; осевая сила $P_{ос}$; радиальная сила P_r . Кроме того, низкая крутильная и изгибная жесткость ВИ влияет на виброустойчивость технологической системы в процессе резания, увеличивая шероховатость обработанной поверхности.

На рис. 1 обозначены: d — диаметр хвостовика инструмента; R_1 — тангенциальная составляющая реакции от силы закрепления; R_3 — осевая составляющая реакции от силы зажима; $M_{кр}$ — крутящий момент силы резания; $P_{ос}$ — осевая сила резания, x_o — осевое перемещение.

Условия отсутствия проскальзывания инструмента вокруг оси инструмента:

$$R_1 \frac{d}{2} > M_{кр}, \quad (1.1)$$

где $R_1 = T \cdot \mu_1$.

Необходимая сила закрепления [2]:

$$T = \frac{2K_{зан} \cdot M_{кр}}{\mu_1 \cdot d}, \quad (1.2)$$

где $K_{зан}$ — коэффициент запаса для обеспечения надёжности закрепления; μ_1 — коэффициент трения между поверхностями зажимных элементов и хвостовика инструмента при прокручивании.

Под действием радиальной силы резания P_r 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 $\nu_{и1}$, определяющих радиальную жесткость сборки, а под действием крутящего момента $M_{кр}$ происходит упругое скручивание на угол $\nu_{к}$, определяющее крутильную жесткость сборки.

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

$$F_{wk} = mw2R_k, \quad (1.3)$$

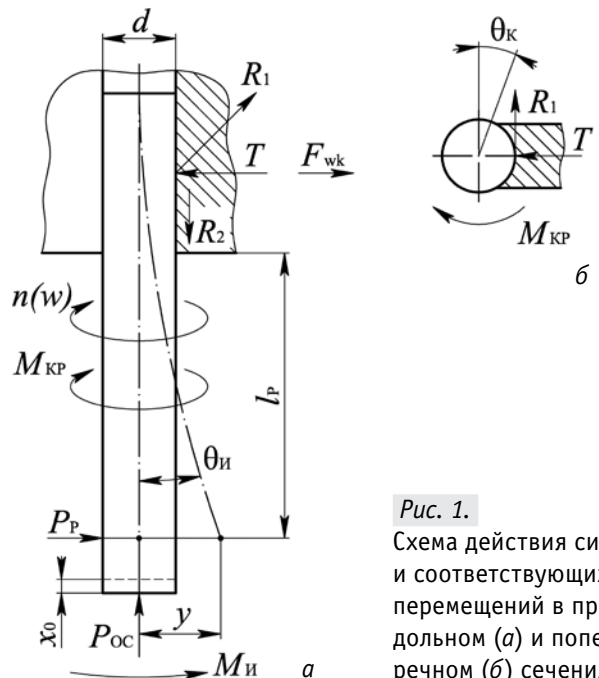


Рис. 1. Схема действия сил и соответствующих перемещений в продольном (а) и поперечном (б) сечениях

где m — масса зажимного элемента; $\omega = \frac{\pi n}{30}$ —

частота вращения сборки в рад; n — частота вращения сборки, мин⁻¹; R_k — расстояние от оси вращения инструмента до центра масс зажимного элемента.

ВИ должен 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 вышеизложенного позволило сформулировать основные критерии выбора ВИ, отвечающего требованиям повышения производительности микрообработки резанием. К ним относятся:

- шероховатость обрабатываемых поверхностей;
- динамическая податливость сборки;
- величина дисбаланса при частоте вращения сборки 25 000 мин⁻¹;
- габариты сборки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали соответствие различных ВИ выявленным критериям. Для этого в Государственном инженеринговом центре (ГИЦ) МГТУ «СТАНКИН» были проведены испытания типовых сборок «режущий инструмент-ВИ».

Испытания проводились на пятикоординатном высокоскоростном станке Roeders RXP 300 (рис. 2) со шпинделем MEYRAT MHF-80, обеспечивающим максимальную частоту вращения 50 000 мин⁻¹, предназначенном для высокоскоростной высокоточной обработки деталей из черных и цветных металлов, высоколегированных сталей, в том числе термообработанных.



Рис. 2. Станок Roeders RXP 300

Для сравнения видов сборок выполняли обработку заготовок платиков из алюминиевого сплава марки АМГ16, закрепленных в приспособлении на столе фрезерного станка Roders RXP 300 (рис. 3).



Рис. 3. Зона резания при обработке платика

Фрезеровали пазы шириной 6 мм твердосплавными четырехзубыми концевыми фрезами с нанопокрывтием с длиной рабочей части 13 мм и цилиндрическим хвостовиком диаметром 6 мм, предназначенными для высокопроизводительного фрезерования цветных металлов. Применяли два вида ВИ с хвостовиком HSK-E 25 для закрепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком (рис. 4).



Рис. 4. Патроны для закрепления концевых фрез с цилиндрическим хвостовиком диаметром 6 мм: термopатрон для закрепления способом термических деформаций (вверху); цанговый патрон (внизу)

Устанавливали зависимости шероховатости обработанной поверхности от глубины резания.

Испытания сборок с вылетом от торца шпинделя, равным 95 мм, проводили на частоте вращения 30 000 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 сборка с цанговым патроном при глубине резания более 2,3 мм не обеспечивала заданную шероховатость R_a 1,25. Сборка на базе термopatрона при тех же условиях обеспечивала обработку поверхности с шероховатостью R_a 1,25 при глубинах резания до 3,8 мм (рис. 5).

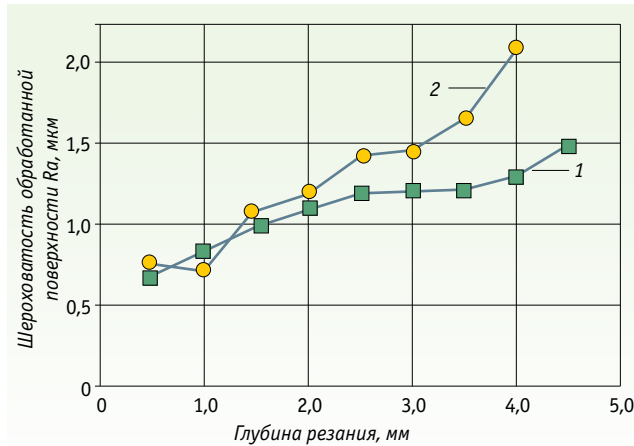


Рис. 5. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от глубины резания:
1 — термопатрон; 2 — цанговый патрон

Проводили испытания сборок для установления зависимости шероховатости обработанной поверхности от времени резания. Во время испытаний в сборках использовали новые фрезы в состоянии поставки, которыми вели обработку с глубиной резания 1 мм. Было установлено, что сборка с цанговым патроном позволяет в 1,5 раза дольше работать, обеспечивая заданную шероховатость поверхности, чем в случае сборки на базе термopatрона (рис. 6). Это может быть объяснено

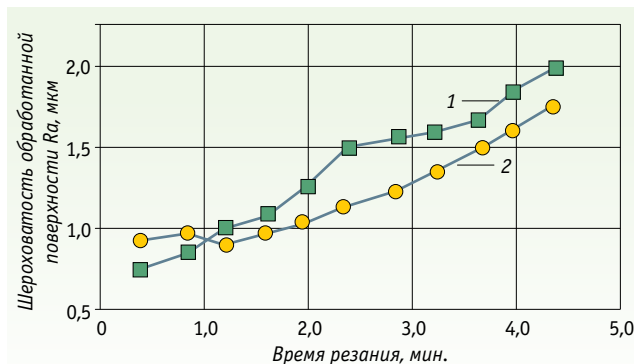


Рис. 6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от времени резания:
1 — термопатрон; 2 — цанговый патрон

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 ВИ 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, закрепленной в патронах, как показано на рис. 4. Имеющиеся конструктивные отличия приводят к различию динамической податливости ВИ, что является основной причиной разброса среднеквадратических значений виброускорений, указанных в таблице. В области частот до 1 кГц уровень этих значений, особенно по оси Y, при фрезеровании с использованием цангового патрона выше, чем при использовании термopatрона.

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
Y	Цанговый патрон	0.27	0.022	0.062	0.4	0.35
X	Термопатрон	0.32	0.04	0.052	0.27	0.2
Y	Термопатрон	0.15	0.046	0.059	0.4	0.28

Спектры динамической податливости для разного вспомогательного инструмента 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 термopatрона.

Выявляли преимущества различных видов ВИ по критерию остаточного дисбаланса в различных сборках с концевыми фрезами. Проводили эксперименты на станке модели Roders 600 (Германия), имеющем шпиндель HSK 63A с максимальной частотой вращения 32 000 мин⁻¹ и биением конического отверстия в пределах 0,002 мм.

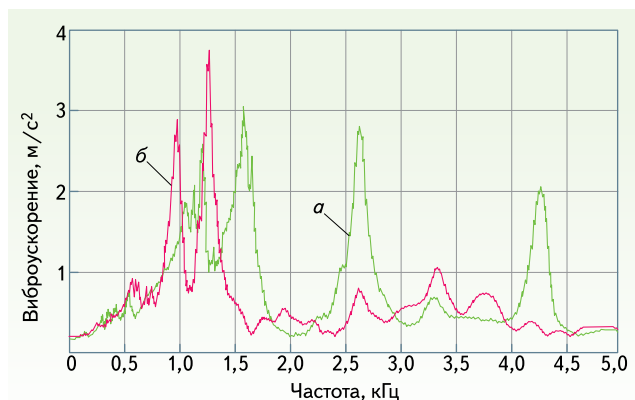


Рис. 7. Характеристики динамической податливости ВИ: а — термопатрон; б — цанговый патрон

Испытаниям подвергали следующий ВИ с хвостовиками HSK-A63 по DIN 69893 (табл. 2 и 3).

Измерение остаточного дисбаланса сборок проводили на балансировочной машине фирмы «Haimeg» (Германия) с чувствительностью по наименьшему дисбалансу — 1 г · мм. Эксперименты показали, что у различных сборок имеется, помимо начального дисбаланса, большой разброс результатов балансировки (табл. 4), который должен быть устранен за счет ряда изменений в конструкции ВИ.

По критерию наименьших габаритов ВИ следует отметить явное преимущество термопатронов, как имеющих наименьшие размеры по сравнению с другими ВИ. Это преимущество термопатрона позволяет увеличить вылет инструмента без значительного увеличения диаметральных габаритов при сохранении жесткости и точности закрепления.

В соответствии с установленными критериями в МГТУ «СТАНКИН» разработана ИС для микрообработки на высокоскоростных станках с ЧПУ со шпинделями с конусом HSK 25E и с конусом HSK 63A (рис. 8).

В созданную систему включены: термопатрон 1 с конусом HSK 25E и посадочным отверстием Ø5,94H6 под инструмент с хвостовиками диаметром 6 мм; цанговый патрон 2 с конусом HSK 25E и посадочным отверстием под набор цанг 3 с посадочными отверстиями под инструмент с цилиндрическим хвостовиком в интервале Ø3...10 мм через каждые 0,5 мм; удлинитель 4 с цилиндрическим хвостовиком Ø16g6 мм и посадочным отверстием Ø5,94H7 под инструмент с хвостовиками Ø6h6 мм; термопатрон 5 с конусом HSK 63A и посадочным отверстием Ø15,84H6 под инструмент с хвостовиками Ø6h6 и Ø16h6 мм; концевые и дисковые фрезы с цилиндрическими хвостовиками Ø6h6 мм; конце-

Таблица 2. Вспомогательный инструмент с хвостовиками HSK-A63 по DIN 69893

№ п/п	Тип ВИ	Диапазон зажима, мм	Предельная частота вращения, мин ⁻¹	Биение контрольной оправки, мм
1	Цанговый патрон	1–12	25 000	0,01
2	Гидравлический патрон	6–25	25 000	0,005
3	Патрон с боковым прижимом винтами	6–25	20 000	0,02
4	Термопатрон	6	50 000	0,003

Таблица 3. Виды, размеры и масса балансируемой сборки ВИ с хвостовиком HSK-63A и твердосплавной фрезы диаметром 6 мм

Тип ВИ (обозначение по табл. 2)	Диаметр зажимной части ВИ, мм	Вылет сборки от торца шпинделя, мм	Вылет фрезы из ВИ	Масса фрезы, г	Масса сборки, г
1	32	120	30	70	1070
2	40	120	26	70	1180
3	40	120	22	70	1120
4	32	120	25	70	870

Таблица 4. Измерения дисбаланса сборок и достигаемый класс точности дисбаланса

Тип ВИ (см. табл. 2)	Масса, г	Замеренный остаточный дисбаланс, г · мм			Среднее значение дисбаланса (в г · мм) при частоте вращения, мин ⁻¹		Требуемый класс точности балансировки			
		Минимальный	Максимальный	Разброс	15 000	24 000	G2,5		G6,3	
							Частота вращения, мин ⁻¹			
		15 000	24 000	15 000	24 000	Достигаемый класс точности				
1.	1070	22,20	27,10	4,90	6,29	10,06	3,96	2,22	6,90	4,06
2.	1180	1,20	6,66	5,46	5,43	8,69	2,53	1,58	6,32	3,95
3.	1120	0,10	11,67	11,67	8,44	13,50	3,45	2,15	8,62	5,39
4.	870	0,65	5,25	4,60	4,27	8,43	2,20	1,37	5,49	3,43

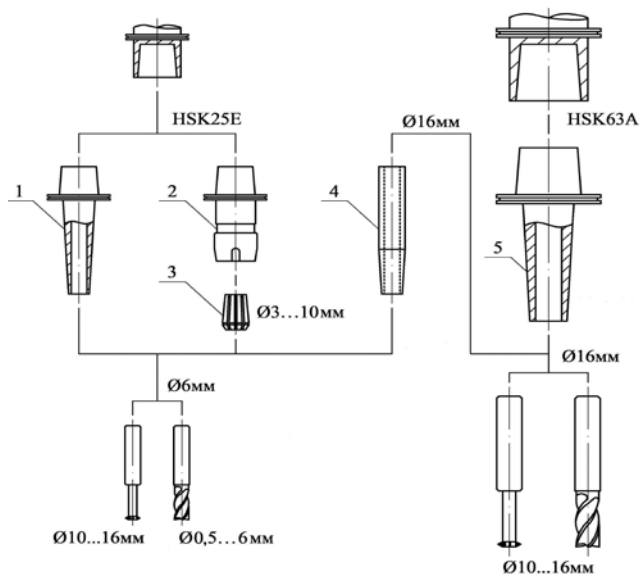


Рис. 8. Инструментальная система МГТУ «СТАНКИН» для микрообработки

вые и дисковые фрезы с цилиндрическими хвостовиками Ø10h6 и Ø16h6 мм. На все элементы ИС разработаны чертежи, по которым изготовлены опытные образцы отдельных типоразмеров ВИ для эксплуатации на станке фирмы Roders RXP 300 (Германия) в ГИЦ МГТУ СТАНКИН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник. — М.: Машиностроение. 2006. 336 с.

2. 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: ЗМОК. 2010. 446 с.
3. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. и др. Диагностика автоматизированного производства / Под ред. С.Н. Григорьева. — М.: Машиностроение. 2011. 600 с.
4. 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.
5. Гурин В.Д., Григорьев С.Н., Алешин С.В., Семенов В.А. Исследование силовых параметров при фрезеровании концевыми фрезами для диагностирования их состояния // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 19–22.
6. Григорьев С.Н., Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Синопальников В.А. Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 4. С. 27–36.

Александр Александрович БОРИСОВ —
аспирант МГТУ «СТАНКИН»

Андрей Руффович МАСЛОВ —
доктор технических наук, профессор МГТУ «СТАНКИН»

СТАНЭКСИМ выпустил станок с одним план-суппортом для обработки соединительных деталей трубопроводов

Новый станок для механической обработки соединительных деталей трубопроводов (СДТ) успешно прошел испытания на производственной площадке СТАНЭКСИМ. Станок стал продолжением комплексного инженерингового решения компании в рамках совместного проекта Челябинского трубопрокатного завода (ЧТПЗ) и ОАО «РОСНАНО». Данный инновационный проект предусматривает строительство предприятия по выпуску соединительных деталей трубопроводов с использованием наноструктурированных материалов.

Станок способен обрабатывать торцевые фаски соединительных деталей трубопроводов различного типа (тройников, отводов, катушек) диаметром от 159 до 1420 мм. Отличительная особенность нового станка — его оснащение одним

горизонтальным силовым узлом и поворотным столом с приспособлением для установки обрабатываемых деталей. Такое решение позволяет проводить обработку соединительных отводов с различным углом поворота (30°, 45°, 60°, 90°).

Новый станок оснащен системой ЧПУ и обладает рядом конструктивных особенностей, обеспечивающих высокую производительность, точность, качество обработки, а также удобство работы оператора.

Станок может использоваться как в составе производственного комплекса, так и в качестве отдельного оборудования, что делает его востребованным на различных предприятиях трубной промышленности.

www.stankoreport.ru