

УДК 621.923

В. Н. ГЕЙЧУК, В. А. МОСЕЙЧУК**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВОГО И ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА РОТОРНЫХ СТАНКАХ**

В данной работе выполнен сравнительный анализ производительности магнитно-абразивной обработки на РТК с магнитными системами "кольцевая ванна" двух типов. Первая из них - магнитная система с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах, вторая - электромагнитная система с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками. В результате проведенных исследований определено, что более продуктивным является РТК, состоящий из станка со шестишпindelной роторной головкой и магнитной системы второго типа. При этом величина вспомогательного времени меньше в РТК, который состоит из магнитной системы первого типа и одношпindelного блока в схвате робота.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, роторный станок, робот, производительность, осевой инструмент.

Вступление. Применение высокоскоростных методов резания и агрессивных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) делает актуальным повышение эксплуатационных свойств режущего инструмента. Перспективным методом финишной обработки, потенциально способным в комплексе обеспечить необходимые свойства режущего инструмента, в частности концевой и осевой, является магнитно-абразивная обработка (МАО) в кольцевой ванне в условиях больших рабочих зазоров. Этот способ относится к так называемым объемным способам обработки и позволяет обработать детали сложной конфигурации, в т.ч. с полузакрытыми пазами и карманами. Кроме того, данный способ обработки должен обладать высокой производительностью, поскольку предполагает использование станков роторного типа.

Анализ последних достижений и литературы. Ранее этому способу обработки достаточно большое внимание уделили основатели магнитно-абразивной обработки [1, 5, 11, 12] и их последователи [6 - 9, 14, 17]. За последние годы появилось достаточно большое количество работ посвященных объемной МАО деталей различных типов [2, 3, 4, 15, 19]. Большинство этих работ посвящено в основном исследованию влияния магнитно-абразивного инструмента [4, 8, 15], технологических режимов и приспособлений [4, 6, 8, 10, 15, 17, 19] на качество обработки изделий. Некоторые из них [2, 3, 10, 12] посвящены вопросам разработки оборудования для реализации данного способа обработки. Как известно, магнитные системы типа "кольцевая ванна" делятся на два типа: с торцевой [1 - 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19] и радиальной загрузкой [1, 6, 9, 11, 12, 17] с неподвижными [2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19] и вращающимися [1, 11, 12, 19] полюсными наконечниками. Кроме того, еще одной характерной конструктивной особенностью обеих типов магнитных систем является источник магнитного поля: от постоянных магнитов [1, 6, 9, 11, 12] и от электромагнита постоянного или выпрямленного тока [2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 19,]. В работе [5] установлено, что в общем случае процесс МАО наиболее эффективен, если магнитный поток создается выпрямленным двухполупериодным электрическим током.

Как отмечается в этих и других работах [17], обрабатываемость материалов магнитно-абразивным методом и производительность является весьма сложной функцией физико-механических свойств заготовок, технологических режимов процесса, параметров магнитно-абразивных порошков (МАП) и СОТС. Особую степень влияния авторы отводят схеме обработки и кинематике процесса. В частности, в работе [19] проведены сравнительные исследования качества обработки в магнитных системах - электромагнитной с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками [18] и с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах [20]. Качество обработки (по показателям: шероховатость поверхностей, округление кромок, микротвердость и остаточные напряжения) оказались выше при обработке в магнитной системе первого типа. Автором [19] было высказано предположение, что одной из основных причин разности в качестве обработки по обеим схемам является разная кинематика процессов.

Однако сравнительного анализа производительности обработки по этим двум принципиальным схемам в доступных источниках не обнаружено.

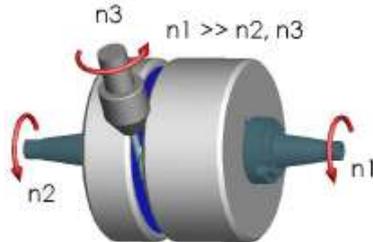
Цель работы. Целью данной работы является сравнительный анализ производительности магнитно-абразивной обработки в магнитных системах с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах и электромагнитной с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками.

Постановка задачи. Для сравнительного анализа были выбраны две принципиальные схемы обработки. На базе магнитной системы с радиальной загрузкой с вращающимися полюсными наконечниками на постоянных магнитах построены станки серий MF 62 и MF 72 фирмы Magnetfinish GmbH, Германия [20]. Общий вид станка серии MF 72 и схема движений, реализуемых в станках, показана на рис. 1. Станки предназначены для снятия заусенцев, округления режущих кромок и полировки поверхностей на осевых и концевых режущих инструментах диаметром $0,1 \div 16$ мм или $0,1 \div 25$ мм. MF 62С предназначен для обработки инструментов диаметром от 0,1 мм до 25 мм.

© В. Н. Гейчук, В. А. Мосейчук, 2015



а



б

Рис. 1 – Станок серии MF 72: а – общий вид станка серии MF 72; б – схема движений, реализуемых в станках

Станки имеют два различных модуля для обработки концевой рабочей и цилиндрической частей инструментов. Это позволяет обрабатывать, например, главные режущие кромки сверл, сферических концевых фрез, и режущие кромки на цилиндрической части, а также полировать канавки. Станки обеих серий имеют устройства автоматической загрузки МАП. Загрузку / выгрузку заготовок в рабочую зону, начальную установку и движение круговой подачи осуществляет поштучно робот. Станки серии MF 72 имеют два магазина на 120 заготовок, как заявляет фирма, для 24 часовой непрерывной работы. Станки серии MF 62 поставляются как с магазином, так и без него.

На кафедре конструирования станков и машин НТУУ «КПИ» была спроектирована гамма роторных станков [3] для MAO деталей сложной формы, построенных с использованием модульного принципа. Одним из основных модулей является магнитная система типа «кольцевая ванна» с торцевой загрузкой с неподвижными полюсными наконечниками [18]. На базе станка для обработки концевой и осевого инструментов разработан робото-технический комплекс (РТК) (рис. 2).

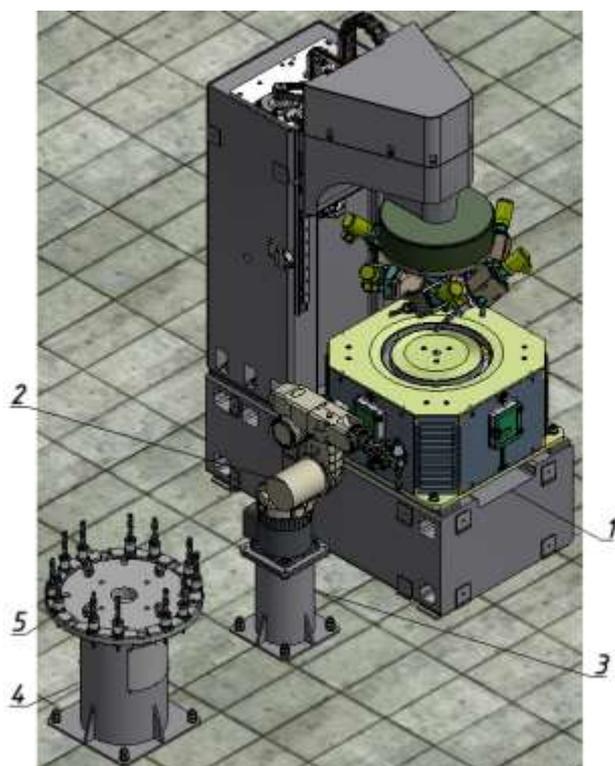


Рис. 2 - Общий вид РТК для MAO концевой и осевого инструмента

РТК предназначен для снятия заусенцев, округления режущих кромок и полировки и упрочнения поверхностей на осевых и концевых режущих инструментах диаметром $0,1 \div 25$ мм. В состав РТК входят шестишпindelный роторный станок 1, универсальный легкий шестиосный промышленный робот (ПР) 2 модели KR5-SIXX-R650 компании KUKA Roboter GmbH (Германия) с угловой системой координат, установленный на колонне 3; поворотный стол индексации 4 со сменным дискообразным лотком 5, в котором размещаются 18 заготовок, установленных в приспособлениях-спутниках (ПС). Ограждение рабочей зоны РТК на рисунке не показано. ПР 2 последовательно извлекает из шпинделя каждой рабочей головки готовые детали, устанавливает в гнездо лотка 5, извлекает из гнезда заготовку и устанавливает в зажимное электромеханическое приспособление рабочей головки.

Во время обработки заготовки осуществляют следующие движения:

- главное движение резания со скоростью V_p - вращение роторной головки;
- движение основной круговой подачи со скоростью V_S - вращение заготовки вокруг своей оси;
- вертикальное перемещение роторной головки со скоростью V_Z - движение врезания.

Сравнительные расчеты производительности выполнялись для сверл диаметром 10 мм, общей длиной $L = 184$ мм и с длиной рабочей части $l = 121$ мм, ориентировочный средний годовой объем выпуска деталей $N = 50000$ шт; среднее количество дней, на которые нужно обеспечить запас деталей $t = 5$.

Материалы и результаты исследования.**РТК со шестишпиндельной роторной головкой и магнитной системой с торцевой загрузкой**

Последовательность обработки: опускание роторной головки на высоту рабочей зоны ($B_{ПН} = 30$ мм); позонная по длине рабочей части инструмента обработка при ступенчатом перемещении на высоту рабочей зоны со скоростью вертикальной подачи $S_Z = 250$ мм/мин [8] и с промежуточными остановками подачи на $t_{ост} = 35$ с (0,58 мин); вывод инструмента из рабочей зоны на рабочей подаче.

Штучно-калькуляционное время [13]:

$$T_{ум-к} = T_{ум} + T_{нз}/n, \quad (1)$$

где $T_{ум}$ - штучное время, затрачиваемое на обработку одной заготовки;

$T_{нз}$ - подготовительно-заключительное время, затрачиваемое на всю партию, включающее время на подготовку и наладку РТК;

$n = (N \cdot t)/F = 976$ шт - количество заготовок в партии;

$F \approx 256$ дн. - годовой фонд рабочего времени в днях.

Штучное время:

$$T_{ум} = T_{ом} + T_{д} + T_{об} + T_{н}, \quad (2)$$

где $T_{ом}$ - основное технологическое время;

$T_{д}$ - вспомогательное время, включающее в себя: время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y ; время на управление станком РТК T_{yn} ; время холостых ходов T_{xx} ; время индексации $T_{ин}$ (поворот лотков с заготовками, поворот роторной головки на одну позицию); время на замену порции отработанного порошка; время на контрольные измерения T_k ;

$$T_{д} = T_y + T_{yn} + T_{xx} + T_{зм} + T_k; \quad (3)$$

$T_{об}$ - время технического и организационного обслуживания рабочего места;

$T_{н}$ - время перерывов на отдых и физиологические потребности.

Для данного РТК принимаем: $T_n = 0$; $T_k = 0$, так это время полностью перекрывается оперативным временем $T_{он} = T_{ом} + T_{д}$, и контрольные операции проводятся по окончании цикла обработки и вне РТК; $T_{зм} = 0$, так как необходима только периодическая замена порции магнитно-абразивного порошка, время на его замену входит составляющей в $T_{об}$; $T_{yn} = 0$, так как управление автоматическим циклом осуществляется системой ЧПУ в сочетании с контроллером ПР.

Время технического и организационного обслуживания принимаем в размере 1% от оперативного времени: $T_{об} = 0,01 \cdot T_{он}$.

Длину рабочего хода определяем с учетом угла наклона оси заготовки $\xi = 50^\circ$.

$$L_{р.х.} = l \cdot \cos(\xi) = 78 \text{ мм}. \quad (4)$$

Количество промежуточных остановок $i_o = L_{р.х.}/B_{ПН} = 2,6$; принимаем $i_o = 3$.

Основное технологическое время при количестве одновременно обрабатываемых заготовок $i_{заг} = 6$:

$$T_{ом} = 2L_{р.х.}/(i_{заг} \cdot S_Z) + i_o \cdot t_{ост}/i_{заг} = 0,394 \text{ мин.} \quad (5)$$

Время холостых ходов:

$$T_{xx} = 2L_{х.х.}/(i_{заг} \cdot S_{бн}) = 0,025 \text{ мин.}, \quad (6)$$

где $L_{х.х.} = 222$ мм - длина холостого хода;

$S_{бн} = 3000$ мм/мин - скорость быстрого подвода / отвода шпиндельной бабки.

Для определения времени на установку и смену заготовок необходимо определить время движения схвата ПР (рис. 3, а) по траектории (рис. 3, б) при выполнении цикла снятия и установки приспособлений-спутников.

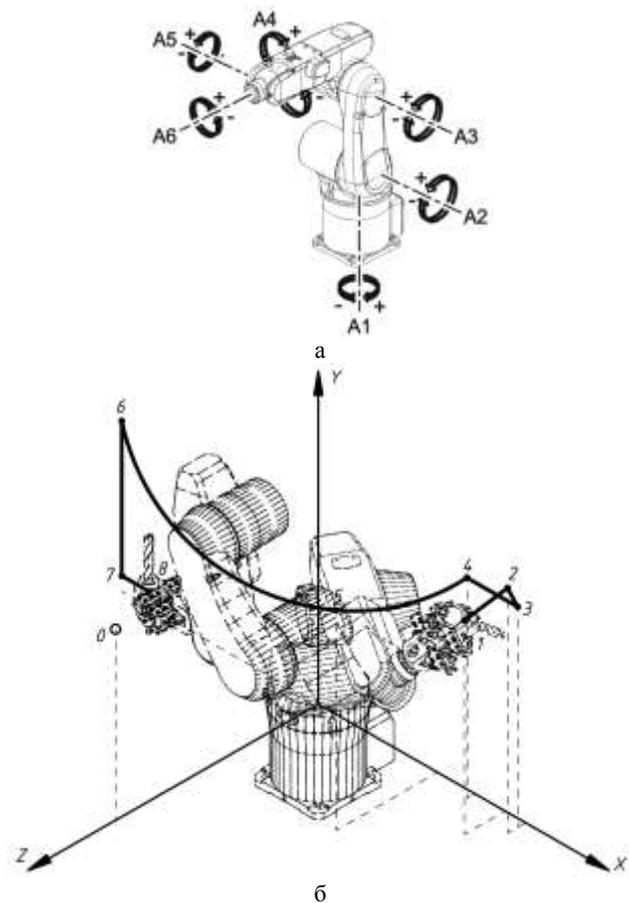


Рис. 3 - ПР мод. KR5-SIXX-R650 : а – оси ПР мод. KR5-SIXX-R650; б – траектория движения его схвата при выполнении цикла установки и замены приспособлений-спутников (координаты точек траектории приведены в таблице 1)

Расчет времени движения рабочего органа ПР по участкам траектории выполнялся при максимально

допустимых относительных угловых скоростях, при этом учитывалось, что контроллер ПР при интерполяции по осям снижает фактические угловые скорости быстрых перемещений. Время движения принималось

по наибольшему времени для данного участка. Результаты расчета приведены в таблице 2. Цикл работы лотка и время цикла представлены в таблице 3.

Таблица 1 - Координаты характерных точек траектории движения рабочего органа ПР (по рис. 3)

№ точки	Координаты (x; y; z), мм	Угловые координаты по осям ПР, град					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	(0; 492; 598,3)	0,0°	-90,0°	+90,0°	0,0°	0,0°	0,0°
1	(551; 551,2; 119,7)	-60,54°	-63,76°	+75,98°	-133,05°	+88,99°	+76,57°
2	(611; 630,8; 52,9)	-70,09°	-47,15°	+35,14°	-130,141°	+65,64°	+76,57°
3	(611; 567,3; 22,8)	-78,15°	-61,77°	+70,17°	-137,68°	+74,09°	+86,32°
4	(461; 567,3; 22,8)	-73,27°	-94,44°	+108,68°	-136,82°	+81,63°	+86,78°
5	(351,3; 567,3; 299,4)	-30,0°	-94,44°	+108,68°	-136,82°	+81,63°	+86,78°
6	(-580; 439; 0)	+90,0°	-96,22°	+106,0°	-180,0°	+9,78°	0,0°
7	(-580; 40,2; 0)	+90,0°	-48,15°	+136,87°	-180,0°	+88,71°	0,0°
8	(-500,4; 40,2; 0)	+90,0°	-52,7°	+153,42°	-180,0°	+100,71°	0,0°

Примечание: точка 0 - исходное положение ПР; участок 2-3 - установка ПС в рабочий шпиндель или снятие; участок 4-3 - отвод ПС от шпиндельной бабки или подвод к ней; участок 4-5 - выход из рабочего пространства станка в свободную зону; участок 6-7 установка ПС на лоток или снятие с лотка; точки 1 и 8 - положение перед вводом захватного устройства (ЗУ) для захвата приспособления-спутника (ПС), в шпинделе или в лотке (соответствуют участкам траектории 1-2 и 8-7)

Таблица 2 - Продолжительность движения по участкам траектории при максимально допустимых угловых скоростях ПР с максимальной полезной нагрузкой 5 кг

Участок	Диапазоны изменения углов Δ (град), скорости (град/с), времени движения t (с) по осям и максимальное время t _{max} (с)																		
	A1			A2			A3			A4			A5			A6			t _{max}
	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	Δ	v	t	
0-8	90	375	0,24	37,3	300	0,12	53,4	375	0,14	180	410	0,44	100,7	410	0,25	0	660	0,0	0,44
0-1	60,6	375	0,16	26,3	300	0,09	14,02	375	0,04	133,1	410	0,33	89,0	410	0,22	76,6	660	0,12	0,33
1-2	9,6	375	0,03	16,6	300	0,06	40,9	375	0,11	3,0	410	0,01	23,4	410	0,06	0,0	660	0,0	0,11
2-3	8,1	375	0,03	18,7	300	0,07	35,1	375	0,1	7,6	410	0,02	8,5	410	0,02	9,8	660	0,02	0,1
3-4	4,9	375	0,02	32,7	300	0,11	38,5	375	0,11	0,9	410	0,002	7,6	410	0,02	0,5	660	0,001	0,11
4-5	43,3	375	0,12	0,0	300	0,0	0,0	375	0,0	0,0	410	0,0	0,0	410	0,0	0,0	660	0,0	0,12
5-6	120	375	0,32	1,8	300	0,06	2,7	375	0,008	43,2	410	0,11	71,9	410	0,18	86,8	660	0,14	0,32
6-7	0,0	375	0,0	48	300	0,16	30,9	375	0,09	0,0	410	0,0	79,0	410	0,2	0,0	660	0,0	0,2
7-8	0,0	375	0,0	4,6	300	0,016	16,6	375	0,05	0,0	410	0,0	12,0	410	0,03	0,0	660	0,0	0,05
1-8	151	375	0,41	37,3	300	0,13	63,5	375	0,17	180	410	0,44	101,0	410	0,25	76,6	660	0,12	0,44

Таблица 3 - Цикл работы лотка емкостью 18 инструментов (индексация осуществляется через 2 позиции)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц	$C_1 \rightarrow 4C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow 2(C_1 \rightarrow 4C_5 \rightarrow C_6) \rightarrow C_1 \rightarrow 4C_2 \rightarrow C_3$	3,156
C_1	$(08) \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)}{ИПС} \rightarrow \frac{(18)}{ИШБ}$	0,072
C_2	$(87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)}{ИПС} \rightarrow \frac{(18)}{ИШБ}$	0,063
C_3	$(87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow \frac{(65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21) \rightarrow (10)}{ИПС}$	0,055
C_4	$ПШБ \rightarrow (01) \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{III} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow ИПС \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{III} \rightarrow P \rightarrow (21)$	0,213

Таблица 3 – (окончание)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц_5	$\text{ИШБ} \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow$ $\text{ИПС} \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{\text{Ш}} \rightarrow P \rightarrow (21)$	0,174
Ц_6	$\text{ИШБ} \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow (56) \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow$ $\text{ИПС} \rightarrow (87) \rightarrow 3 \rightarrow (76) \rightarrow (65) \rightarrow (54) \rightarrow (43) \rightarrow (32) \rightarrow 3_{\text{Ш}} \rightarrow P \rightarrow (21) \rightarrow (10)$	0,18
Ц_7	$\text{ПШБ} \rightarrow (01) \rightarrow (12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (81)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,152
Ц_8	$(12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (81)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,096
Ц_9	$(12) \rightarrow 3 \rightarrow P_{\text{Ш}} \rightarrow (23) \rightarrow (34) \rightarrow (45) \rightarrow \left(\frac{56 \rightarrow (67) \rightarrow P \rightarrow (78) \rightarrow (80)}{\text{ИШБ}} \right)$	0,063

Примечание: 3 - зажим в захватном устройстве; P - разжим захватного устройства; $3_{\text{Ш}}$ - зажим в рабочем шпинделе; $P_{\text{Ш}}$ - высвобождение из рабочего шпинделя; ПШБ - позиционирование шпиндельной бабки и рабочего шпинделя; ИПС - индексация поворотного стола лотка (паллеты); ИШБ - индексация шпиндельной бабки, позиционирование рабочего шпинделя

Продолжительность цикла рассчитана с учетом коэффициента динамичности $k_d = 1,2$, который учитывает время на разгон и торможение для повышения точности позиционирования на наиболее характерных участках.

Результаты расчета штучно-калькуляционного времени для данного РТК представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Заключительные результаты расчета для магнитной системы с торцевой загрузкой

Время на замену лотка и повторный запуск программы цикла обработки $T_{\text{змл}}$, мин.	1,0
Время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y , мин.	0,23
Вспомогательное время T_o , мин.	0,255
Оперативное время $T_{\text{оп}}$, мин.	0,649
Время технического и организационного обслуживания $T_{\text{об}}$, мин.	0,006
Штучное время $T_{\text{шт}}$, мин.	0,655
Подготовительно-заключительное время $T_{\text{пз}} = (10 \dots 20)/976$, мин.	0,01...0,02
Штучно-калькуляционное время $T_{\text{шт-к}}$, мин.	0,665...0,675

РТК с одношпиндельным рабочим блоком на кисти робота и магнитной системой с радиальной загрузкой

На кисти универсального шестиосного ПР KR5-SIXX-R650 установлен шпиндельный блок с нормализованным трехкулачковым пневматическим зажимным устройством, например, производства компании FESTO [21]. Обрабатываемые заготовки размещаются на специальном лотке. После зажима заготовки ин-

струмента в захватном устройстве, робот вынимает заготовку из лотка, переносит в рабочую зону магнитной системы и осуществляет его обработку с тангенциальной или с радиальной подачей [6, 20] величиной $S_p = S_T = 250$ мм/мин. Подача может осуществляться как на входе так и на выходе из рабочей зоны. При этом ПР может менять режим обработки и угол наклона оси заготовки. По окончании обработки ПР устанавливает обработанный инструмент в лоток, отводит кисть от лотка, выполняется индексация поворотного стола и цикл повторяется.

Длина рабочего хода при данной схеме обработки $L_{p.x.} = 121$ мм, длина хода на рабочей подаче при вводе и выводе инструмента $L_{\text{неп.}} = 10 \dots 15$ мм.

Основное технологическое время при тангенциальной подаче с одной остановкой длительностью $t_{\text{осм}}$:

$$T_{\text{от(т)}} = 2 \cdot \frac{L_{p.x.} + L_{\text{неп.}}}{S_T} + t_{\text{осм}} \quad (7)$$

Основное технологическое время при радиальной подаче с тремя промежуточными остановками $i_{\text{осм}} = 3$, угол наклона оси заготовки 40° :

$$T_{\text{от(р)}} = 2 \cdot \frac{L_{p.x.} + L_{\text{неп.}}}{S_p} + i_{\text{осм}} \cdot t_{\text{осм}} \quad (8)$$

Определяем вспомогательное время, траектория движения рабочего органа ПР будет подобной и близкой к траектории движения при предыдущей компоновке. Учитывая относительно большие скорости движения, ориентировочно траектория будет включать участки 0-6 или близка 0-8, 8-7, 7-6, 6-4, 4-8 и 4-0 или близка 1-0 (см. рис 3, табл. 1 и 2). Цикл для лотка емкостью 18 инструментов (табл. 5).

Результаты расчета штучно-калькуляционного времени для данного РТК представлены в таблице 6.

Таблица 5 - Цикл работы лотка емкостью 18 инструментов (коэффициент динамичности $k_d = 1,2$)

№ цикла	Запись цикла	Время, мин.
Ц	$C_1 \rightarrow 16C_2 \rightarrow C_3$	1,405
C_1	(06) \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76)	0,07
C_2	ИПС \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76)	0,078
C_3	ИПС \rightarrow (67) \rightarrow 3 \rightarrow (78) \rightarrow (84) \rightarrow (MAO) \rightarrow (48) \rightarrow (87) \rightarrow P \rightarrow (76) \rightarrow (60)	0,087

Таблица 6 – Заключительные результаты расчета для магнитной системы с радиальной загрузкой

Время на замену лотка и повторный запуск программы цикла обработки $T_{змл}$, мин.	1,0	
Время на установку заготовки в рабочую зону и удаление детали из рабочей зоны T_y , мин.	0,14	
Вспомогательное время T_θ , мин.	0,14	
Оперативное время	$T_{оп(т)}$, мин.	1,808
	$T_{оп(р)}$, мин.	2,504
Время технического и организационного обслуживания $T_{об}$, мин.	0,02	
Штучное время	$T_{шт(т)}$, мин.	1,828
	$T_{шт(р)}$, мин.	2,524
Подготовительно-заключительное время $T_{пз} = (10 \dots 20)/976$, мин.	0,01...0,02	
Штучно-калькуляционное время	$T_{ш-к(т)}$, мин.	1,84...1,85
	$T_{ш-к(р)}$, мин.	2,54...2,55

Выводы.

1. В результате проведенных исследований определено, что более продуктивной РТК со шестипиндельной роторной головкой, несмотря на то, что продолжительность вспомогательного времени меньше в РТК с однопиндельных рабочим блоком в руке работа.

2. Резервом для повышения производительности обработки является роторная линия на базе магнитной системы с вращающимися полюсными наконечниками с радиальной загрузкой. Предварительные проработки показывают, что главными недостатками магнитной системы с торцевой загрузкой (в данном случае) является совпадение главного движения резания и движения транспортировки и технические сложности ввода / вывода заготовок в кольцевую ванну.

Список литературы: 1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю. М. - Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с. 2. Гаврушкевич А.

Ю. Анализ кинематики магнитно-абразивной обработки цилиндрических зубчатых колес в кольцевой ванне [Электронный ресурс] / А. Ю. Гаврушкевич, В. Н. Гейчук, // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2015. - Том 3, № 1. С. 21-28. Режим доступа до статті: <http://elibrary.ru/contentP.asp?issueid=1364921>. 3. Гейчук В. М. Синтез кинематики процессу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Гейчук Володимир Миколайович. - Київ, 2012. – 472 с. 4. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. - Київ, 2014. - 175 с. 5. Коновалов Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев.– Мн.: Наука и техника. 1967. – 125 с. 6. Литвиненко В.А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Литвиненко Валентина Алексеевна. – Ленинград, - 1985. – 259 с. 7. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, - 1988. – 170 с. 8. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с. 9. Михолап С.В. Магнитно-абразивная обработка наружных поверхностей трубчатых изделий: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / С.В. Михолап. - Минск, 1992. - 20 с. 10. Нижник С.Н. Оборудование для магнитно-абразивной обработки сложнофасонных деталей ГТД / С.Н. Нижник, В.И. Куципак, В.А. Матюхин, О.В. Покатов, В.Н. Фандеев // Авиационно-космическая техника и технология, 2004, № 7 (15). С. 220-224. 11. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки/ Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с. 12. Скворчевский Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки/Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерыцын – Мн.: Наука і техніка, 1991. – 215 с. 13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с. 14. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06/Степанов Олег Васильевич. - Киев, 1997. - 145 с. 15. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. - Київ, 2015. - 175 с. 17. Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий: моногр. - Минск: БНТУ, 2006. - 218 с. 18. Пат. 84464 Україна В24В 31/112 (2006.01). Магнітна система для об'ємної обробки феромагнітними порошками / В.М. Гейчук, В.С. Майборода; заявник та патентовласник. Національний технічний університет України "КПІ". а200611768; заявл. 08.11.2006; опубл. 27.10.2008; бюл. № 20. 19. Byelzaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung//Dissertation. - 2008. Magdeburg. 20. <http://www.magnetfinish.com>. 21. <http://www.festo.com>.

Bibliography (transliterated): 1. Baron Yu.M. Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov / Baron Yu. M. - L.: Mashinostroenie, 1986. – 176 P. 2. Gavrushkevich A. Yu. Analiz kinematiki magnitno-abrazivnoy obrabotki tsilindricheskikh zubchatykh kolez v kol'tsevoy vanne [Elektronniy resurs] / A. Yu. Gavrushkevich, V. N. Geychuk, // Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. - 2015. - Vol 3, No 1. P. 21-28. Rezhim dostupu do statii: <http://elibrary.ru/contentP.asp?issueid=1364921>. 3. Geichuk V. M. Syntez kinematyky protsesu mahnitno-abrazivnoy obrabotky v kiltsevii vannii: dyP. ... dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 / Geichuk Volodymyr Mykolaiovych. Kiev, 2012. – 472 P. 4. Dzhulii D.Iu. Pidvyshchennia yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdospaynykh plastyn pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni v kiltsevii vannii: dyP. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. - Kiev, 2014. - 175 P. 5. Konovalov E.G. Chistovaya obrabotka detaley v magnitnom pole ferromagnitnymi poroshkami / E.G. Konovalov, G.P. Shulev.– Minsk: Nauka i tekhnika. - 1967. – 125 P. 6. Litvinenko V.A. Finisnaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey s vysokimi trebovani-

yami k kachestvu metodom MAP s vrashchayushcheysya rabochoy zonoj: diP. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / Litvinenko Valentina Alekseevna. – Leningrad, - 1985. – 259 P. **7.** Maiboroda V.P. Magnitno-abrazivnaya obrabotka spetsial'nykh detaley: diP. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / Maiboroda Viktor Stanislavovich. – Kiev, - 1988. – 170 P. **8.** Maiboroda V.P. Osnovy stvorennia i vykorystannia poroshkovoho mahnitno-abrazivnoho instrumentu dlia finishnoi obrobky fazonnykh poverkhon: dyP. ...dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 / Maiboroda Viktor Stanislavovich. – Kiev, 2001. – 404 P. **9.** Mikhola P.V. Magnitno-abrazivnaya obrabotka naruzhnykh poverkhnostey trubchatykh izdeliy: avtoref. disP. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: 05.03.01, 05.02.08 / P.V. MikholaP. – Minsk, 1992. – 20 P. **10.** Nizhnik P.N. Oborudovanie dlia magnitno-abrazivnoy obrabotki slozhnofa-sonnykh detaley GTD / P.N. Nizhnik, V.I. Kutsipak, V.A. Matyukhin, O.V. Pokatov, V.N. Fandeev // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2004, No 7 (15). С. 220-224. **11.** Sakulevich F.Yu. Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki / F.Yu. Sakulevich – Minsk: Nauka i tekhnika, 1981. – 328 P. **12.** Skvorchevskiy N.Ya. Effektivnost' magnitno-abrazivnoy obrabotki/N.Ya. Skvorchevskiy, E.N. Fedorovich, P.I. Yashcheritsyn – Minsk: Navuka i tekhnika, 1991. – 215 P. **13.** Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2-kh t. Vol. 2 /Pod red. A. G. Kosilovoy i R. K. Meshcheryakova. – 4-e izd., pere-

rab. i doP. – Moscow: Mashinostroenie, 1985. 496 P. **14.** Stepanov O.V. Issledovanie protsessa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlia obrabotki detaley slozhnoy formy: diP. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.06/Stepanov Oleg Vasil'yevich. – Kiev, 1997. – 145 c. **15.** Tkachuk I.V. Formuvannia mahnitno-abrazivnoho instrumentu zi stabilnymy vlastyostiamy v robochykh zazorakh kiltsevoho typu dyP. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. – Kiev, 2015. – 175 P. **17.** Khomich N. P. Magnitno-abrazivnaya obrabotka izdeliy: monogr. - Minsk: BNTU, 2006. - 218 P. **18.** Pat. 84464 Ukraina V24V 31/112 (2006.01). Mahnitna sistema dlia ob'iemnoi obrobky feromahnitnyy poroshkamy / V.M. Geichuk, V.P. Maiboroda; zaiavnyk ta patentovlasnyk. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "KPI". a200611768; zaiavl. 08.11.2006; opubl. 27.10.2008; biul. № 20. **19.** Byelzaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung/Dissertation. - 2008. Magdeburg. **20.** <http://www.magnetfinish.com>. **21.** <http://www.festo.com>.

Поступила (received) 10.10.2015

Гейчук Владимир Николаевич – доктор технических наук, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", доцент, профессор кафедры "Конструирование станков и машин"; адрес: 03056, г. Киев, пр. Победы, 37, корп. 1, к. 230; тел.: 067-436-98-44; e-mail: geychukw@mail.ru; poroshinw@gmail.com.

Geichuk Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", associate professor, professor of the department "Construction machinery and vehicles"; Address 03056, Kyiv, Pr. Victory, 37, Bldg. 1, k. 230; tel.: 067-436-98-44; e-mail: geychukw@mail.ru; poroshinw@gmail.com.

Мосейчук Виктор Алексеевич – инженер, частное предприятие "Киев Гидропривод"; адрес: 04136, Киев, ул. Северо-Сырецкая, 3; тел.: 067-935-95-35; e-mail: victor_mvva@meta.ua.

Moseichuk Viktor – Engineer, the Private Enterprise "Kyiv Hidropryvod"; Address: 04136, Kyiv, Pivnichno-Syretska Street, 3; tel.: 067-935-95-35; e-mail: victor_mvva@meta.ua.