

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.923

Л. М. Акулович, д.т.н., профессор; Л. Е. Сергеев, к.т.н., доцент; Е. В. Сенчуров; С. К. Дубновицкий
Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет», Министерство сельского хозяйства
и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь,
+375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА
МАХОВИЧКОВ ВОДОПРОВОДНЫХ ВЕНТИЛЕЙ**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований параметров качества поверхностей маховичков водопроводных вентилях из стали 20X13 после магнитно-абразивной обработки. Предложена схема магнитно-абразивной обработки маховичков. Проанализировано распределение ферроабразивного порошка в рабочей зоне в процессе обработки. Определены зависимости шероховатости поверхности и производительности магнитно-абразивной обработки маховичков от технологических режимов.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; ферроабразивный порошок; качество поверхности; маховичок.

Рис. 5. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, E. V. Senchurov, S. K. Dubnovitskiy
Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Nezavisimosti Av., 220023 Minsk, Belarus, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**MAGNETO-ABRASIVE MACHINING OF FLYWHEELS
OF THE WATER SUPPLY VALVES**

In the article, the results of experimental research of the parameters of quality of surfaces of flywheels of the water supply valves from steel X20Cr13 after magnetically-abrasive machining are presented. The chart of magneto-abrasive machining of flywheels has been offered. The distribution of ferro-abrasive powder in the working zone in the process of machining has been analysed. The dependences of surface roughness and productivity of magneto-abrasive machining of flywheels on technological modes have been determined.

Key words: magneto-abrasive machining; ferro-abrasive powder; surface quality; flywheel.

Fig. 5. Table 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Конкурентоспособность выпускаемой продукции не может быть достигнута без создания и внедрения новых видов обработки сложнопроводных поверхностей деталей, способных обеспечивать высокую производительность и качество обработки. В сантехническом оборудовании используются модели кранов типа одноручковых (рычаг) и двухвентильных (маховички) [1]. Последние варианты отличаются надежностью, долговечностью, низкой стоимостью, удобством захвата и вращения и имеют ряд конструктивных вариантов: крест, квадро, трио, эрика и т. д., среди которых вид квадро характеризуется наиболее лаконичным дизайном и простотой в использовании [2]. Маховички водопроводных вентилях сантехнической арматуры часто имеют особо сложные профили поверхностей. Материалами для маховичков служат бронза, латунь, нержавеющая сталь, золото, серебро, керамика, стекло, пластмасса и дорогие сорта древесины повышенной твердости [2]. Исключая элитный характер сантехнической арматуры, широкое применение на средних и крупных промышленных

предприятиях согласно СНИП 2.04.01-85 получили маховички, изготовленные из нержавеющей стали и пластмассы, поскольку латунь и бронза обладают высокой стоимостью, керамика и стекло — повышенной хрупкостью. Пластмассовые маховички имеют низкую, в сравнении со стальными, стойкость, подвержены воздействию климатических факторов, требуют обязательно плавного перекрытия потока воды из одного положения в другое и склонны к интенсивному образованию известкового налёта на поверхности, что ухудшает их внешний вид.

Основная часть. Согласно [3] параметр шероховатости видимых поверхностей маховичков без покрытия должен составлять $Ra < 2,5$ мкм, что не обеспечивается горячей объемной штамповкой и последующей токарной обработкой, и требует использования финишной обработки. Применение покрытий на основе никелирования повышает стоимость маховичков и отличается отслаиванием покрытий от основы из-за низкого показателя адгезии, а также динамических, химических и температурных колебаний. Традиционно полирование маховичков по причине сложного профиля деталей производится по технологиям в среде свободного абразива, к которым относятся виброабразивная обработка и доводка. Однако при виброабразивной обработке наблюдается неравномерный съём металла с различных участков поверхностей деталей. Плохо обрабатываются труднодоступные участки — канавки, углубления, внутренние поверхности деталей. Для получения шероховатости, соответствующей $Ra = 0,16...0,32$ мкм, необходима длительная обработка в несколько переходов со сменой наполнителя и составов смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), что существенно увеличивает трудоемкость финишной операции. Высокий уровень шума, сопровождающий работу виброустановок, ухудшает условия труда рабочих [4]. Процесс доводки является трудоемким, малопроизводительным, содержит, как правило, большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы [5]. Использование электрохимической обработки характеризуется необходимостью получения предварительного высокого параметра шероховатости на уровне 9...11 классов и экологически вредным производством [6].

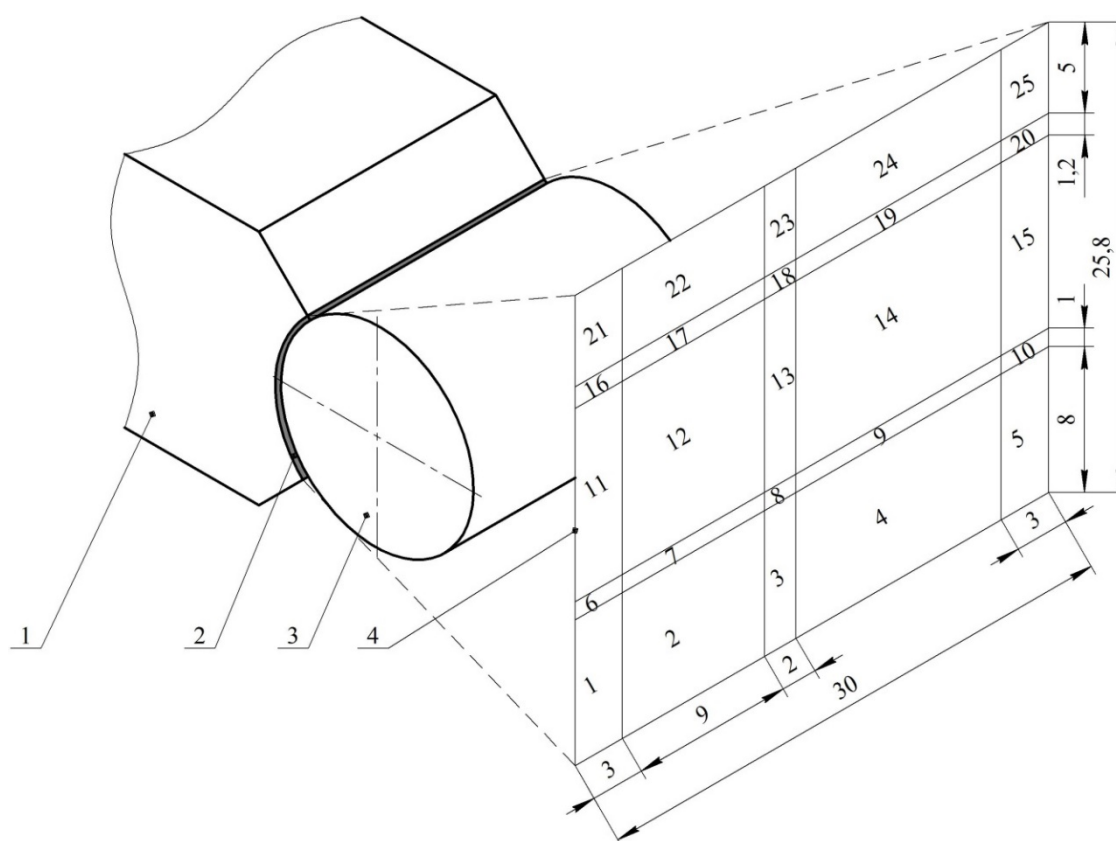
Одним из перспективных методов финишной обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО) [7; 8]. При обработке в магнитном поле переориентация абразивных частиц порошка наиболее острой кромкой к обрабатываемой поверхности осуществляется с помощью энергии магнитного поля. Особенностью способа является ориентированное абразивное резание. В результате явлений самоорганизации частицы незакрепленного абразива под действием магнитного поля устанавливаются перпендикулярно обрабатываемой поверхности и, уплотняясь, образуют ферроабразивную «щетку». Процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс организованного абразивного резания. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент.

Узким местом финишной обработки, в том числе и МАО, таких деталей и придание им требуемого товарного вида является топологически сложно развитая поверхность предлагаемых к обработке маховичков. Среди факторов, которые следует особо учитывать при обработке, находятся конусообразность профиля и форма сечения в горизонтальной плоскости, сходная с алгебраической кривой 2-го порядка типа астроида. По данной причине технической проблемой является необходимость образования требуемой степени конформности поверхностей обрабатываемой детали и полюсных наконечников. Наличие полноты прилегания этих поверхностей обеспечивает требуемые показатели качества и производительности процесса МАО, при этом важную роль играет фактор магнитного поля. Направление движения магнитного потока и занимаемое в связи с этим его положение в зоне обработки зависят от стремления данного потока определить свое энергетически выгодное состояние, которое не всегда адекватно условиям эффективного протекания процесса МАО.

Установлено, что конструктивные элементы рабочих зазоров электромагнитной системы (ЭМС) магнитно-абразивного оборудования и условия формирования ферроабразивной «щётки» позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей деталей машины [7]. В работе [9] выявлено изменение степени относительного уплотнения ферроабразивной «щётки» на различных локальных участках рабочей зоны. Установлено, что ферроабразивный порошок (ФАП) осуществляет образование уплотнительных областей не только в непосредственной близости от детали, но и на определённом от нее расстоянии [7]. В статичном положении ферроабразивной «щётки» коэффициент уплотнения имеет максимальные значения рядом с поверхностью полюсных наконечников, присутствует неравномерность распределения зёрен ФАП по объёму рабочей зоны (рисунок 1 и таблица 1) [9].

Анализ полученных данных (рисунок 1 и таблица 1) показывает, что наименьшая пористость и, соответственно, наибольшая относительная плотность ФАП наблюдается по границам рабочего зазора, достигая максимальных значений на выходе из зазора и по его углам.

В связи с вышеизложенным одним из вариантов решения проблемы достижения требуемой степени конформности поверхностей обрабатываемых маховичков водопроводных вентилей и полюсных наконечников является увеличение рабочих зазоров при росте магнитной индукции в целях обеспечения необходимого давления ферроабразивной «щётки» на деталь, а также использование полюсных наконечников прямоугольного сечения и рабочей поверхностью в виде плоскости.



1 — полюсный наконечник; 2 — ФАП в рабочем зазоре, фиксированный жидкой самоотвердеющей пластмассой (образец); 3 — обрабатываемая деталь; 4 — схема нарезки развертки образца на элементы

Рисунок 1. — Схема распределения ФАП в пространстве обработки [8]

Т а б л и ц а 1. — Концентрация ФАП в областях рабочего зазора [9]

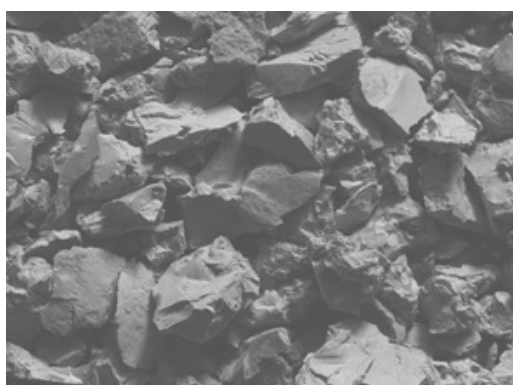
Номер элемента образца	Относительное количество порошка	Пористость ферроабразивной «щетки»	Коэффициент уплотнения ФАП
1	0,6343	40,3038	1,7188
2	0,5294	58,1767	1,2048
3	0,5144	60,4618	1,1391
4	0,5294	58,1767	1,2048
5	0,6343	40,3038	1,7168
6	0,5233	59,0128	1,1807
7	0,5152	60,1375	1,1484
8	0,4765	65,1616	1,0037
9	0,5152	60,1375	1,1484
10	0,5233	59,0128	1,1807
11	0,5886	52,1990	1,3771
12	0,5131	60,4670	1,1390
13	0,4752	65,5187	0,9934
14	0,5131	60,4670	1,1390
15	0,5686	52,1990	1,3771
16	0,5323	56,8040	1,2157
17	0,5278	58,3835	1,1990
18	0,4630	67,0040	0,9506
19	0,5278	58,3835	1,1990
20	0,5323	56,8040	1,2157
21	0,6369	39,7451	1,7360
22	0,6355	10,0143	1,7262
23	0,6690	48,7831	1,4756
24	0,6355	40,0143	1,7282
25	0,6369	39,7451	1,7360

Главная задача при MAO маховичков водопроводных вентилях заключается в установлении характера, расположении и распространении зоны уплотнения с целью ее контроля и эффективного использования для обеспечения требуемого качества поверхности деталей. Предложено регулировать степень уплотнения такими технологическими факторами процесса MAO, как скорость резания, градиент и магнитная индукция в рабочем зазоре ЭМС. Проведенные исследования показали, что формирование ферроабразивной «щетки» при наличии детали и реализации кинематического и динамического режимов обеспечивает получение других значений коэффициента уплотнения на аналогичных, как при статичном режиме, локальных участках рабочей зоны. Контроль распространения уплотнённого фронта ферроабразивной «щетки» первоначально производился на минимальной скорости резания с его последующей остановкой на различных участках рабочей зоны и визуальным наблюдением за характером изменения расположения зёрен ФАП.

Для реализации процесса MAO маховичков водопроводных вентилях, выполненных согласно ГОСТ 19681-83, из нержавеющей стали 20X13 используется построение модели ферроабразивной «щетки». Первичной информацией для построения физической модели ферроабразивной «щетки» является то, что строение пористых материалов имеет сложную структуру, так как имеется совокупность частиц и пор различной формы и размера, которые расположены относительно друг друга либо беспорядочно, либо с малой степенью упорядоченности. Однако при наложении электромагнитного поля (ЭМП) на зону обработки

методом МАО происходит образование цепочек ферроабразивных частиц в соответствии с расположением силовых линий. Также ввиду использования технологии разлома спека при изготовлении ФАП осуществляется получение осколочной вытянутой формы частиц (рисунок 2), распределение которых в рабочей зоне характеризуется их ориентацией наибольшей осью вдоль магнитных силовых линий.

Выявлено, что обработка в рабочей зоне одной детали с ее аксиальным расположением не позволяет добиться требуемого построения первоначального состояния ферроабразивной «щётки» и не обеспечивает необходимого качества поверхности маховичка. Требуемое уплотнение порошка достигалось позиционированием трёх маховичков с планетарной схемой закрепления в шпинделе для сектора, имеющего угол 120° (рисунок 3). Анализ показывает, что такое неравномерное распределение маховичков по периферии рабочей зоны приводит к созданию отдельных квазистабильных веерообразных полуцилиндров, определяемых фронтовым возмущением. Вытеснение определенной доли ФАП за пределы рабочего зазора характеризуется формированием флокулярной системы на торцовых поверхностях полюсных наконечников. Наличие флокул указывает на переход от упаковки зёрен порошка в виде цепочек к более плотной и объёмной. Увеличение коэффициента уплотнения от $K_y = 1$ до значения 1,7 позволяет стабилизировать текстуру ферроабразивной «щётки», отсутствует эффект разрушения полуцилиндров при увеличении скорости резания от 1 м/с до 1,5...2 м/с. Расположение маховичков участками с большим радиусом кривизны для рассекания массива ферроабразивной «щётки» обеспечивает вытеснение зёрен ФАП на боковые участки с меньшим радиусом кривизны. Отрицательный характер кривизны боковых участков по отношению к носовому способствует интенсивности обработки, однако за кормовым участком маховичков возникает зона разрежения полуцилиндров уплотнения, что приводит к неравномерности шероховатости поверхности. Решение заключается в повороте каждого маховичка на 180° через 60 с обработки и использовании кормового участка детали в качестве носового. Для повышения интенсивности обработки используется ФАП различной грануляции (100 мкм и 250 мкм), поскольку порошки меньшей размерности обладают большей подвижностью и их наличие способствует более быстрому восстановлению полуцилиндров и, соответственно, росту коэффициента уплотнения.

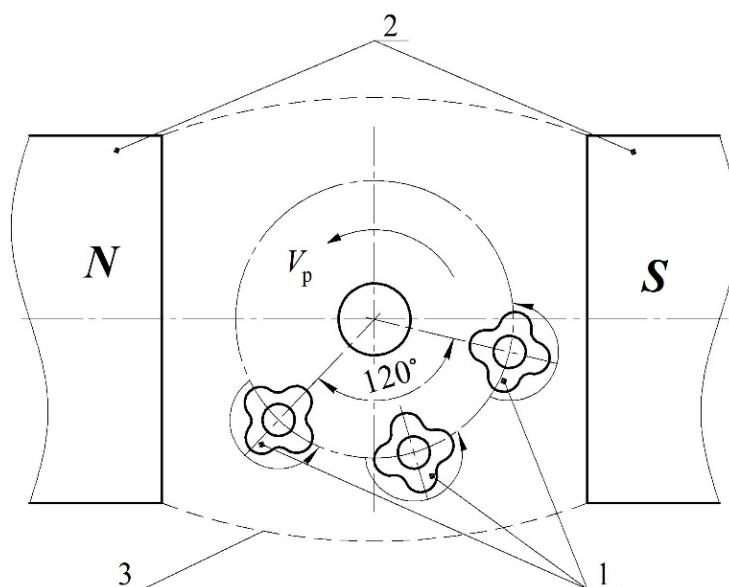


а)



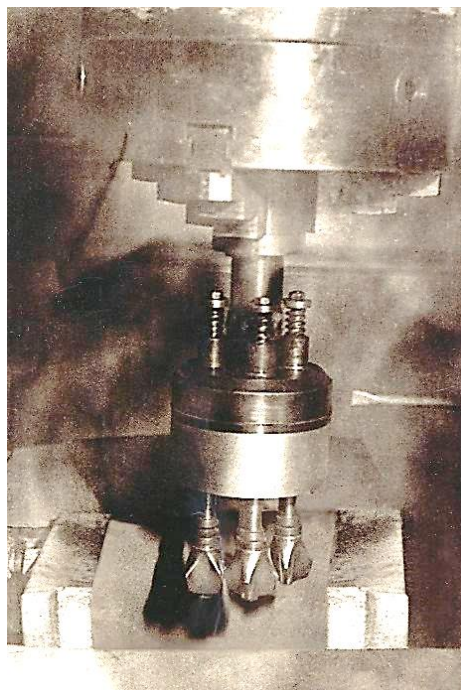
б)

**Рисунок 2 — Форма частиц ФАП Ж15КТ, используемого при обработке поверхностей маховичков, при различных увеличениях (растровая электронная микроскопия).
× 150 (а); × 263 (б)**

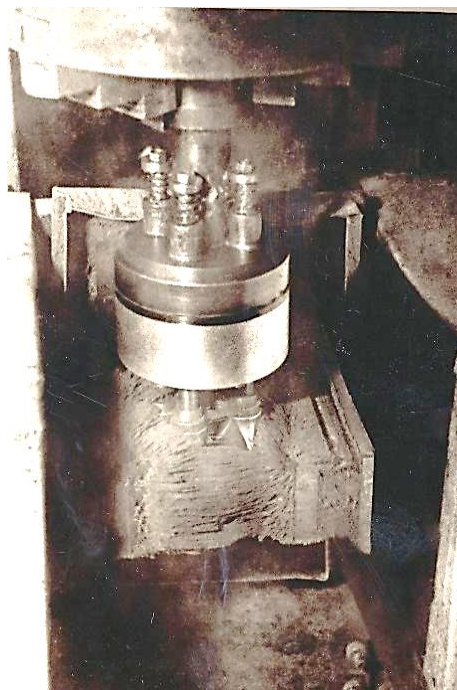


1 — обрабатываемые маховички; 2 — полюсные наконечники;
3 — условная граница ферромагнитной «щетки»

Рисунок 3. — Схема магнитно-абразивной обработки маховичков



а)



б)

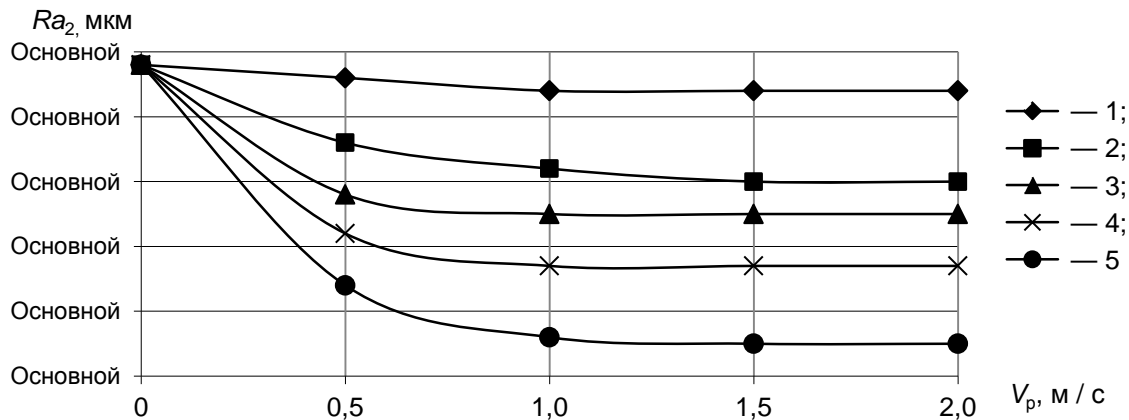
Рисунок 4. — Рабочая зона станка ЭУ-5 до введения маховичков между полюсными наконечниками (а); в процессе MAO маховичков (б)

Экспериментальные исследования MAO маховичков водопроводных вентилях проводились на станке ЭУ-5 с полюсными наконечниками, имеющими плоскую прямоугольную поверхность (рисунок 4).

Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции, $B = 0,6 \dots 1,0$ Т; скорость резания, $V_{рез} = 1 \dots 2$ м / с; величина рабочего зазора, $\delta = 1 \dots 2$ мм; ФАП — Ж15КТ; размерность частиц ФАП, $\Delta_1 = 100$ мкм; $\Delta_2 = 250$ мкм; СОТС — СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5%-й водный раствор; капельная подача СОТС с удельным расходом 150 мл / мин. Образцами для обработки служили маховички водопроводных вентилях ГОСТ 19681-83; материал — сталь 20Х13 ГОСТ 5632-72.

Многопозиционная обработка трех деталей уменьшила время обработки одной детали до 30 с. Результаты исследований приведены на рисунке 5 и в таблицах 2 и 3.

В результате проведенных исследований установлено, что при использовании ФАП Ж15КТ с зернистостью более 250 мкм при полном заполнении рабочего зазора ($K_3 = 1$) в процессе MAO происходит увеличение уплотнения порошка. В случае уменьшения коэффициента заполнения рабочего зазора до $K_3 = 0,8$ процесс MAO по причине снижения режущей способности ферроабразивной «щетки» прекращается. Оптимальной величиной заполнения рабочего зазора, согласно комплексу проведенных исследований, является $K_3 = 0,95$ [10]. Выявлено, что объем частиц ФАП, который был удален механическим способом, при отключении ЭМС после окончания процесса MAO маховичков с боковых поверхностей полюсных наконечников, как показатель флокуляции ферроабразивной «щетки», составил: для $K_3 = 1 \dots 7\%$ от всего объема ФАП, помещенного в рабочую зону; $K_3 = 0,95 \dots 4\%$; $K_3 = 0,9 \dots 3\%$; $K_3 = 0,85 \dots 3\%$ (при учете того, что принимался в расчет объем рабочей зоны и объем помещенных в эту зону маховичков). Это связано с тем, что наличие деталей увеличивает объем ферроабразивной «щетки», и вносит коррекцию в рост коэффициента уплотнения ФАП. В случае отсутствия маховичков в рабочей зоне объем частиц ФАП, который был удален механическим способом, составляет для $K_3 = 1 \dots 6\%$ от всего объема ФАП, помещенного в рабочую зону; $K_3 = 0,95 \dots 4\%$; $K_3 = 0,9 \dots 3\%$; $K_3 = 0,85 \dots 3\%$.



1 — $\Delta_2/\Delta_1 = 100/0$; 2 — $\Delta_2/\Delta_1 = 75/25$; 3 — $\Delta_2/\Delta_1 = 50/50$; 4 — $\Delta_2/\Delta_1 = 25/75$; 5 — $\Delta_2/\Delta_1 = 0/100$

Рисунок 5. — Зависимость шероховатости поверхности маховичков после MAO Ra_2 от скорости резания V_p при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной магнитной индукции $B = 1$ Т

Т а б л и ц а 2. — Производительность процесса MAO G (мг) в зависимости от величины магнитной индукции B при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной скорости резания $V_p = 1$ м / с

Δ_2/Δ_1	$B = 0,6$ Т	$B = 0,8$ Т	$B = 1$ Т
100/0	141	151	185
75/25	130	145	168
50/50	117	124	137
25/75	98	110	116
0/100	84	92	95

Т а б л и ц а 3. — Производительность процесса MAO G (мг) в зависимости от скорости резания V_p при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной магнитной индукции $B = 0,8$ Т

Δ_2/Δ_1	$V_p = 0,5$ м / с	$V_p = 1$ м / с	$V_p = 1$ м / с
100/0	116	151	139
75/25	110	145	126
50/50	103	124	107
25/75	96	110	103
0/100	76	92	85

Внешний вид маховичков после MAO отвечает требованиям образца-эталона, утвержденного в соответствии с ГОСТ 15.009-91: маховички имели резьбу без поврежденных ниток, препятствующих возможности свинчивания вручную, на их поверхностях отсутствовали острые кромки, параметр шероховатости $Ra_2 = 0,63$ мкм. Приемо-сдаточные испытания на соответствие требованиям выдерживания статического давления воды не менее 0,9 МПа и в части внешнего вида проводились для каждого изделия. Проверке на работоспособность подверглись три изделия из всей партии, каждое изделие соответствовало требованиям ГОСТ 19681-83, что позволяет результаты проверки считать достоверными и распространить на всю партию. Проверка расхода воды осуществлялась с использованием манометра класса 2,5 ГОСТ 8625-77, секундомера, ротаметра и мерной емкости объемом 2,5 л. При проверке на герметичность установлено, что отсутствуют капли и струи воды при истечении из трубопровода и потение в местах соединений, уплотнений и на поверхностях деталей. Внешний вид маховичков определяли визуально без применения увеличительных приборов с расстояния 0,5 м при естественном и искусственном освещенности 200 лк. Параметры шероховатости определялись на профилографе-профилометре модели 252 «Калибр».

Получение требуемой шероховатости поверхности маховичков водопроводных вентиляей после MAO позволяет уменьшить попадание и накопление в устье микронеровностей трудноудаляемых органических образований. Поскольку остатки микрофлоры (продукты белкового и жирового распада, непредельные жирные кислоты и т. п.) являются питательной средой для термофильных и термотолерантных микроорганизмов, в число которых входит, например, кишечная палочка, то необходимость достижения заданной шероховатости носит не только эстетический, но и санитарно-гигиенический характер. Также гладкость обработанной поверхности обеспечивает безопасность кожного покрова пальцев при эксплуатации маховичков.

Заключение. Установлено, что в процессе MAO маховичков водопроводных вентиляей при наличии больших рабочих зазоров и использовании полюсных наконечников прямоугольной формы формируется участок с локальным повышением уплотнения ФАП, что, в свою очередь, обеспечивает рост производительности обработки сложнопровильных поверхностей маховичков при учете таких технологических факторов, как скорость резания, величина магнитной индукции и соотношение весовых долей ФАП разной размерности. Определено, что наилучший результат по качеству обработанных поверхностей и производительности процесса MAO достигается при обработке трех маховичков, равномерно распределенных по дуге в секторе, имеющем угол 120° .

Список цитируемых источников

1. Смесители и краны водоразборные. Типы и основные размеры: ГОСТ 25809-96. — Введ. 01.04.98. — Минск : Межгос. науч.-техн. комиссия по стандартизации и нормированию в строительстве (МНТКС) : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1998. — 31 с.
2. *Галкин, П. А.* Большая энциклопедия сантехники / П. А. Галкин, А. Е. Галкина. — М. : Эксмо, 2012. — 288 с.
3. Арматура санитарно-техническая водоразборная. Общие технические условия: ГОСТ 19681-94. — Введ. 01.07.96. — Минск : Межгос. науч.-техн. комиссия по стандартизации и нормированию в строительстве (МНТКС) : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. — 20 с.
4. *Макієнко, М. І.* Загальний курс слюсарної справи / М. І. Макієнко ; пер. з рос. В. К. Сидоренко. — Київ : Вища шк., 1994. — 312 с.
5. *Бабичев, А. П.* Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов н / Д : ДГТУ, 1998. — 624 с.
6. *Житников, В. П.* Импульсная электрохимическая размерная обработка / В. П. Житников, А. Н. Зайцев. — М. : Машиностроение, 2008 — 413с.
7. *Барон, Ю. М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. — Л. : Машиностроение, 1986. — 172 с.
8. *Сакулевич, Ф. Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1981. — 326 с.
9. *Крымский, М. Д.* Распределение уплотнения магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний : сб. науч. тр. / ИПМ АН УССР. — Киев : Ин-т проблем материаловедения АН УССР. — 1980. — С. 92—97.
10. Формирование качества сложнопольных поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2016. — 296 с.

Поступил в редакцию 14.03.2019