

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.11

УДК 621.9

В.Ф. Макаров, К.Р. МуратовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ИЗДЕЛИЙ**

Выполнен обзор схем и анализ кинематики существующих отечественных и импортных плоскододовочных станков. Представлены станки с жесткой кинематической связью и станки с фрикционной связью между заготовками и инструментом (притиром). Наиболее универсальными и распространенными в мире являются плоскододовочные станки с вращающимся инструментом (притиром). Также описаны станки с колебательным движением притира. Представлены разработанные и изготовленные в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ, Россия) плоскододовочные станки модели «Растр». Кинематика станков позволяет бесступенчато регулировать параметры траектории движения притира (инструмента). Из-за сложности сетки и неповторяемости линий, из которых состоит траектория инструмента на станках «Растр», каждое режущее зерно всё время проходит по новому месту обрабатываемой поверхности и не оставляет на ней глубоких следов, благодаря чему уменьшается шероховатость поверхности и повышается точность геометрической формы обработанных поверхностей. Приведены результаты практических экспериментов по влиянию вида траектории инструмента (притира) на величину шероховатости поверхности и скорость съема материала. Исследованы свойства циклоидальных траекторий инструмента на опытной установке для доводки плоскостей, позволяющей регулировать параметры циклоидальной траектории рабочего движения притира. Установлено, что путем регулирования скорости дополнительного вращения притира можно целенаправленно изменять плотность сетки следов циклоидальных траекторий инструмента и тем самым формировать необходимые эксплуатационные свойства микрорельефа обрабатываемой поверхности. Проведенные исследования на опытной установке лягут в основу разработки и изготовления прецизионного плоскододовочного станка.

Ключевые слова: плоскододовочные станки, кинематика рабочего движения инструмента, точность геометрической формы, шероховатость поверхности, «растровая» траектория, циклоидальная траектория, время доводки, зернистость микропорошков, удельное давление, суммарный съем материала.

V.F. Makarov, K.R. Muratov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EQUIPMENT ANALYSIS FOR FINISHING ABRASIVE
PROCESSING OF FLAT PRECISION SURFACES OF PRODUCTS**

A review of the schemes and analysis of the kinematics of the existing domestic and imported flat lapping machines has been made. Machines with rigid kinematic link and machines with fractional link between the workpieces and the tool (lap) were introduced. The most universal and widespread in

the world are flat lapping machines with rotating tool (lap). In addition, a description of the machines with oscillatory movement of the lap has been introduced. Flat lapping machines of the Raster model developed and manufactured at the Perm National Research Polytechnic University (PNRPU, Russia) have been introduced. The kinematics of the machines makes it possible to steplessly adjust the parameters of the path of the lap (tool) movement. Due to the complexity of the greed and non-repeating nature of the line that constitutes the trajectory of the tool in the Raster machines, each cutting link all the time moves over a new location on the machined surface, and does not leave deep traces on it. Thus, the roughness of the surface decreases, and the accuracy of geometrical shape of the machined surfaces increases. The results of practical experiments have been shown, illustrating the influence of the type of tool (lap) trajectory on the surface roughness and the rate of material removal. The properties of cycloidal trajectories of the tool have been studied on an experimental installation for finishing surfaces, which makes it possible to adjust parameters of the cycloidal trajectory of lap working movement. It was found that by adjusting the speed of additional rotation of the lap, one can purposefully adjust the density of grid of cycloidal trajectories' traces of the tool, thus forming necessary exploitation properties in the micro-relief of the processed surface. The research performed on the experimental installation will become the basis for development and manufacturing of a precision flat lapping machine.

Keywords: flat lapping machines, kinematics of the tool's working movement, accuracy of geometrical shape, surface roughness, raster trajectory, cycloidal trajectory, surface pressure, lapping time, grain micropowders, total removal of material.

Одним из важнейших условий создания новых, более совершенных конструкций машин и приборов является повышение точности и качества обработки поверхностей деталей. Соблюдение жестких допусков на размер и форму деталей, уменьшение шероховатости рабочих поверхностей и удаление дефектного слоя металла – всё это способствует увеличению износостойкости и срока службы деталей, повышению усталостной прочности и антикоррозионной стойкости, а также сохранению требуемых посадок в сопряжениях. Одним из способов повышения точности и качества деталей является процесс финишной абразивной доводки прецизионных поверхностей абразивными и алмазными порошками, пастами и суспензиями на прецизионных станках.

Особенность этого процесса состоит в том, что абразивные зерна (а точнее смесь зерен с компонентами пасты или смазывающе-охлаждающей жидкости) под воздействием инструмента (притир) осуществляют сьем металла. Притир не только сообщает зернам необходимые движения и усилия, но и обеспечивает требуемую точность обработки поверхности.

К числу общих признаков, характеризующих процесс абразивной доводки, относятся:

1) одновременное воздействие на поверхность детали большого числа режущих зерен, протекающее при относительно низких скоростях и давлениях;

2) движение режущих зерен по сложным траекториям;

3) незначительная роль тепловых явлений и отсутствие связанных с ними структурных изменений в поверхностном слое металла [1].

Процесс абразивной доводки используют для получения высокой точности геометрической формы (отклонения от плоскости, плоскопараллельности, цилиндричности составляют от 2–3 до 0,5–0,05 мкм) и малой шероховатости обработанной поверхности деталей ($Ra = 0,16 \dots 0,004$ мкм). Особенно целесообразно применение доводки при обработке тонких и легко деформируемых деталей, а также в случаях, когда необходимо сохранить специальные свойства исходного материала, изменяющиеся при значительных тепловых и силовых воздействиях, или удалить дефектный слой металла, образовавшийся при предшествующей обработке, в частности после шлифования. Наконец, методом взаимной доводки (притирки) прирабатываются друг к другу трущиеся и контактирующие поверхности деталей, работающих в паре, что обеспечивает высокую плотность прилегания и увеличение (до 95 %) фактической поверхности контакта [2, 3].

Установлено, что повышению качества и производительности доводки способствует наличие сложного рабочего движения, складывающегося из нескольких движений инструмента (притира) и обрабатываемой детали. При доводке такой характер кинематики оказывает благоприятное влияние на эффективность процесса по следующим причинам:

1) достигается равномерный износ рабочей поверхности притира, что повышает точность размеров и формы обрабатываемых деталей;

2) абразивные зерна получают возможность работать большим числом своих вершин и граней, что приводит к повышению их режущей способности и стойкости;

3) происходит выравнивание микрорельефа поверхности за счет срезания зернами выступов неровностей и заполнения впадин отсеченным металлом;

4) на обрабатываемую поверхность наносится плотная равномерная сетка следов, что способствует увеличению действительной опорной поверхности детали, создает условия для лучшего удержания смазки [1].

По виду кинематической связи рабочих звеньев исполнительного механизма станки разделяют на два типа: станки с жесткой кинемати-

ческой связью и станки с фрикционной связью между заготовками и инструментом (притиром).

По кинематическому признаку большинство станков можно разделить на две группы: станки с колебательным рабочим движением и станки с вращательным движением притира [4, 5].

Станки с вращающимися притирами

Станки с вращающимися притирами широко применяются в машиностроении. Для плоской доводки, т.е. одной плоскости детали, используют станки с одним притиром – однодисковые станки. Лучшими представителями этой группы из зарубежных станков являются станки Larmaster (Великобритания), Peter Wolters (Германия) [1, 2, 6]; а из отечественных – станки моделей 3803, 3804П, 3806, 3807 и др. На рис. 1 представлен станок фирмы Peter Wolters.

В настоящее время наиболее совершенными являются станки с правильными кольцами. Правильные кольца предназначены для выполнения одновременно двух взаимосвязанных эксплуатационных задач:

1) осуществление правки рабочей поверхности притира в процессе доводки заготовок или принудительной правки поверхности притира вне цикла обработки;

2) выполнение функции сепаратора при свободной установке заготовки или ограничительного фрикционного кольца для размещения внутри него свободно установленного сепаратора с гнездами под заготовки.

Правильные кольца имеют узкий торцовый пояс с прорезями (наклонными, прямолинейными или криволинейными канавками), взаимодействие которого с поверхностью притира через абразивную



Рис. 1. Станок фирмы Peter Wolters 3R-900

прослойку вызывает изнашивание поверхности притира, профиль которого зависит от положения кольца относительно центра притира.

Правильные кольца могут иметь как фрикционную связь с рабочей поверхностью притира, так и жесткую кинематическую связь путем сообщения им принудительного движения. На рис. 2 представлены однодисковые плоскопроводочные станки с правильными кольцами с фрикционной (а) и с жесткой кинематической (б) связями.

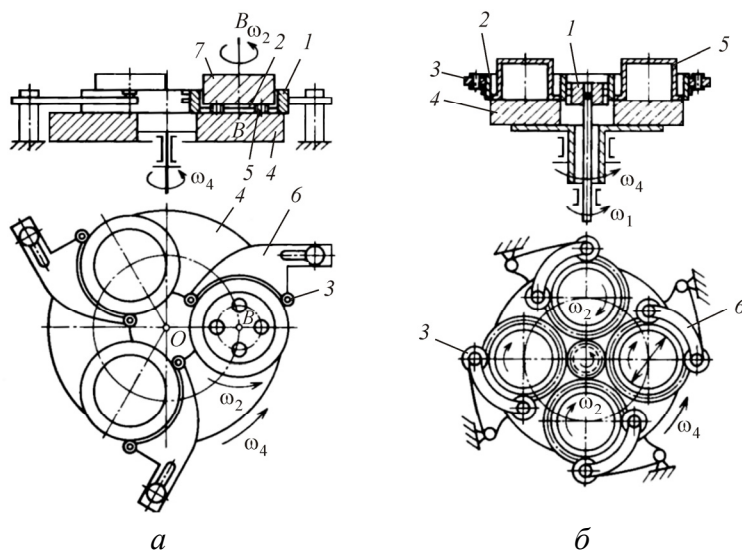


Рис. 2. Кинематические схемы однодисковых плоскопроводочных станков с правильными кольцами с фрикционной (а) и с жесткой кинематической (б) связями между звеньями исполнительного механизма – правильным кольцом, заготовками и притиром

Сепаратор 2 (рис. 2, а) с заготовками 5 и правильным кольцом 1 и грузом 7 вращается вокруг оси В с угловой скоростью ω_2 под действием фрикционных сил по торцам правильного кольца и обрабатываемых поверхностям заготовок 5, взаимодействующих через абразивную прослойку с рабочей поверхностью притира, вращающегося с угловой скоростью ω_4 .

Встречное или попутное принудительное вращение правильных колец (рис. 2, б) создается с помощью жесткой кинематической связи правильного кольца 2 с центральным колесом 1 или фрикционной связи от центрального фрикциона, находящегося во внешнем зацеплении, с правильным кольцом или непосредственно с сепаратором с заготовками.

В станках с фрикционной связью звеньев исполнительного механизма расстояние ОВ между осями притира 4 и правильного кольца 1 с сепаратором 2 и заготовками 5 изменяют относительно оси притира регулированием положения боковых опорных роликов 3. Ролики 3, установленные в вилке 6, совершают вместе с кронштейном качательное движение вокруг неподвижной оси. По такому способу регулирования положения правильных колец работают станки моделей 3803, 3804П, 3808, СППД-2, С-15 и др., а из зарубежных станков можно отметить Lapmaster 12-15-20, Peter Wolters FL3, FL5, FL8, FL12, шлифовально-полировальные станки фирмы Remet (Италия), Waldrich Coburg [4, 6–9]. Нагружение заготовок на этих станках осуществляется накладными грузами или же дополнительно прикладываемой силой от диска прижимного устройства механического, пневматического, гидравлического или электромагнитного типа. На рис. 3 представлен общий вид притирочно-полировального станка Lapmaster модели LM 15, в котором заготовки нагружаются накладными грузами.

Для плоскопараллельной доводки деталей применяются двухдисковые станки, снабженные двумя притирами: верхним и нижним. Такие станки считаются универсальными, так как на них производится обработка как плоских, так и цилиндрических деталей. На рис. 3 представлена кинематическая схема универсально-доводочного станка модели 3816 (Россия). При суммировании вращений верхнего 2 и нижнего 1 доводочных дисков от шпинделей 5 и 8 образуется рабочее движение. При вращении эксцентрика 7 от привода шпинделя нижнего притира через муфту 9 сепаратор с деталями, насаженный на палец 3, совершает колебательное движение. Регулирование скорости вращения притиров осуществляется с помощью сменных шкивов. Рабочее давление, а также подъем и опускание верхнего притира осуществляются с помощью гидроцилиндров 4 и 6. Верхний притир 2 имеет возмож-

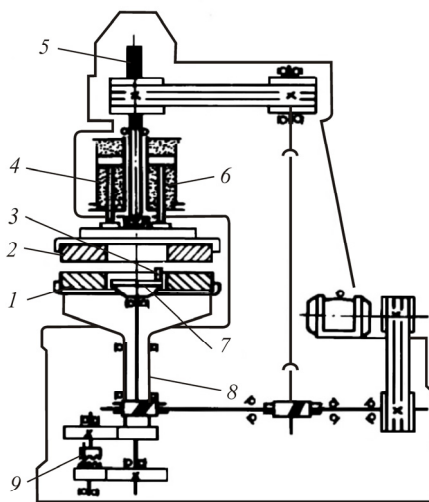


Рис. 3. Кинематическая схема универсально-доводочного станка модели 3816 (Россия)

ность самоустанавливаться по деталям из-за шарнирного крепления. Детали расположены в окнах сепаратора и свободно лежат на поверхности нижнего притира. Притиры правятся с помощью правильных чугуновых дисков, устанавливаемых в специальном сепараторе. Этот станок может работать с непрерывной подачей абразивной суспензии, для чего предусмотрены баки с мешалками и системой трубопроводов. Реле времени позволяет вести доводку с автоматическим циклом.

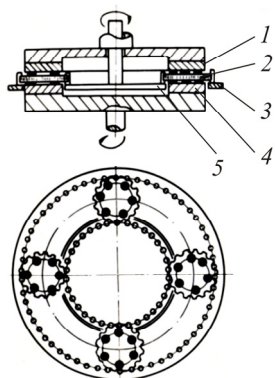


Рис. 4. Схема станка Peter Wolters с планетарными сепараторами

По такой схеме построены отечественные станки моделей 3816, 3816П, 3Б814, 3814П, 3817, а из зарубежных станков Norton (США), Nahr & Kolb (Германия), Namai (Япония) [1, 10–12].

У станков фирмы Peter Wolters (Германия) главной особенностью является устройство сепараторов, выполненных в виде шестерен 2 (рис. 4). Сепараторы-шестерни находятся в зацеплении со штифтовыми венцами наружного кольца 3 и внутреннего диска 5. При вращении диска 5 сепараторы с деталями совершают планетарное движение. Таким образом достигается нанесение на обрабатываемую поверхность сетки следов, а также более равномерный износ притиров 1 и 4.

Станки с вращающимися притирами в силу простоты конструкции и универсальности получили более широкое распространение. Основными достоинствами данной кинематики является возможность обеспечения повышенных скоростей обработки при равномерном распределении абразивного материала. Важно отметить, что наличие вращения притиров отрицательно влияет на точность доводки из-за разных линейных скоростей деталей, находящихся на различном расстоянии от центра вращения притира, поэтому съем металла с деталей и износ притира в разных зонах неодинаковы, что приводит к значительным колебаниям размеров в партии одновременно обрабатываемых деталей. К недостаткам можно отнести неравномерность износа вследствие неравенства линейных скоростей и использование только 1/3 диаметра инструмента из-за нулевой скорости в центре притира. Также к недостаткам этих станков относятся ограниченность (внутренним

диаметром правящих колец) размеров доводимых деталей и высокий расход абразивной пасты, суспензии на доводку самих правильных колец.

Станки с колебательным движением притира

Абразивная доводка плоских поверхностей может выполняться вибрационной притиркой, обеспечивающей высокий уровень механизации, даже в условиях единичного и мелкосерийного производства. Такие станки считаются наиболее универсальными, так как допускают обработку широкой номенклатуры деталей, разнообразных по форме и размерам [12].

На рис. 5 представлена схема вибрационной притирки. Обрабатываемую деталь 1 укладывают на притир 2, жестко соединенный со шпинделем станка, который может поворачиваться и перемещаться вдоль оси. Горизонтально расположенный притир удерживается от вертикальных перемещений вместе со шпинделем с помощью нескольких упругих стержней 3, расположенных под углом к горизонтальной плоскости между притиром и основанием станка 4.

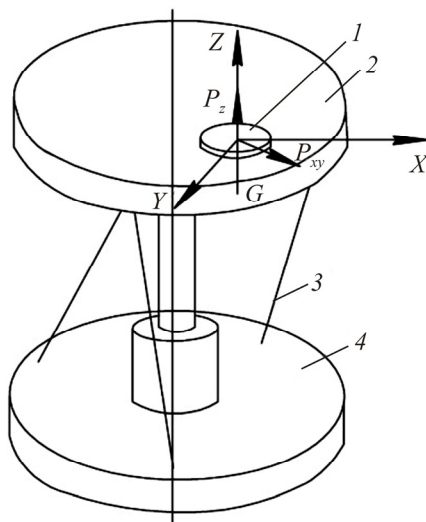


Рис. 5. Схема вибрационной притирки

Под действием вибропривода и сил упругости стержней притир будет совершать крутильные колебания вокруг оси шпинделя и колебаться вдоль этой оси. В результате колебаний масса детали и ускоре-

ние неравномерного движения притира создают силу инерции P , направленную перпендикулярно осям упругих стержней. В случае, когда горизонтальная составляющая силы инерции P_{xy} , параллельная плоскости притира, превысит силу трения, деталь начнет скользить по притиру. Если же вертикальная составляющая P_z силы инерции станет равной силе тяжести детали G , то она оторвется от поверхности притира. Качество и производительность вибрационной притирки будет выше при безотрывочном движении детали по притиру. Для вибрационной притирки плоских поверхностей применяют гамму вибрационных станков с круговым рабочим движением (ИДП-6, ВДП-4М и т.д.).

Недостатком вибропритирочных станков является неравномерный износ рабочей поверхности притиров. Рабочую поверхность притира обычно правят кольцевыми притирами, установленными вместо обрабатываемых деталей [14].



Рис. 6. Общий вид станка «Растр 350»

К станкам с колебательным (поступательным) рабочим движением притира относятся плосководочные станки модели «Растр», разработанные в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ, Россия). На рис. 6 показан общий вид станка модели «Растр 350». Отличительной особенностью станков является неповторяющаяся траектория рабочего движения притира в виде фигур Лиссажу различной сложности [15, 16].

Конструкция станков позволяет бесступенчато регулировать параметры траектории движения притира (инструмента) (рис. 7). Возможность целенаправленного выбора формы и плотности траектории рабочего движения инструмента позволяет формировать микрорельеф обработанной поверхности с оптимальными статистическими параметрами. При этом величина шероховатости по параметрам R_a и R_z может достигаться в нанометровом диапазоне [17].

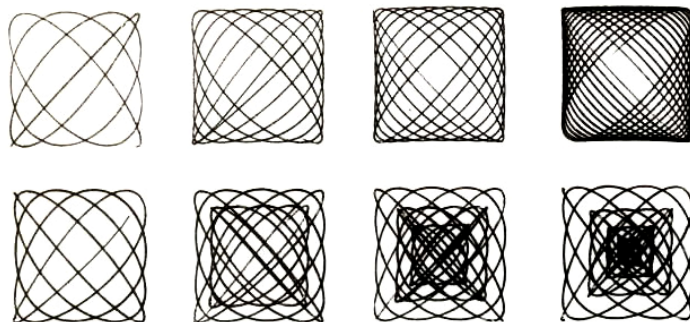


Рис. 7. Траектория рабочего движения инструмента на станках «Растр»

Станки серии «Растр» позволяют обрабатывать как одиночные детали, так и партии деталей в многоместных приспособлениях, а также осуществлять точную правку доводочных дисков. Из-за сложности сетки и неповторяемости линий, из которых состоит траектория инструмента, каждое режущее зерно всё время проходит по новому месту обрабатываемой поверхности и не оставляет на ней глубоких следов, благодаря чему уменьшается шероховатость поверхности. Многократное самопересечение траектории при непрерывной смене направления движения заставляет абразивные зерна работать всеми гранями своих вершин, что повышает режущую способность инструмента и производительность доводки. Растровая кинематика позволяет использовать всю площадь инструмента, а на станках с вращающимся притиром из-за нулевой скорости в центре инструмент используется лишь на 1/3 его диаметра, поэтому на станках с растровой кинематикой возможна обработка детали, соизмеримой с размером притира. К станкам серии «Растр» относятся плоскодоводочные станки модели «Растр 350» стационарного исполнения и «Растр 220» настольного исполнения [18]. В отличие от механизмов плоскодоводочных станков с вращающимся притиром механизмы этих станков позволяют бесступенчато регулировать параметры траектории движения инструмента в процессе доводки.

Кинематическая схема станка «Растр 350» представлена на рис. 8. Планшайба 1, установленная на трех шариковых опорах 2, удерживается от поворота пантографом 3 и приводится в колебательное движение двумя взаимно перпендикулярными шатунами 4 от эксцентриковых валов 5. На одном из валов установлен вариатор скорости 6, по-

звolyющий бесступенчато регулировать величину взаимной расстройки частот колебаний шатунов. Кроме того, с помощью фрикционных ступенчатых роликов 7 за счет дополнительного поворота противососов 8 можно изменять эксцентриситет шатунных шеек 9 и плавно уменьшать амплитуды колебаний притира во время работы станка.

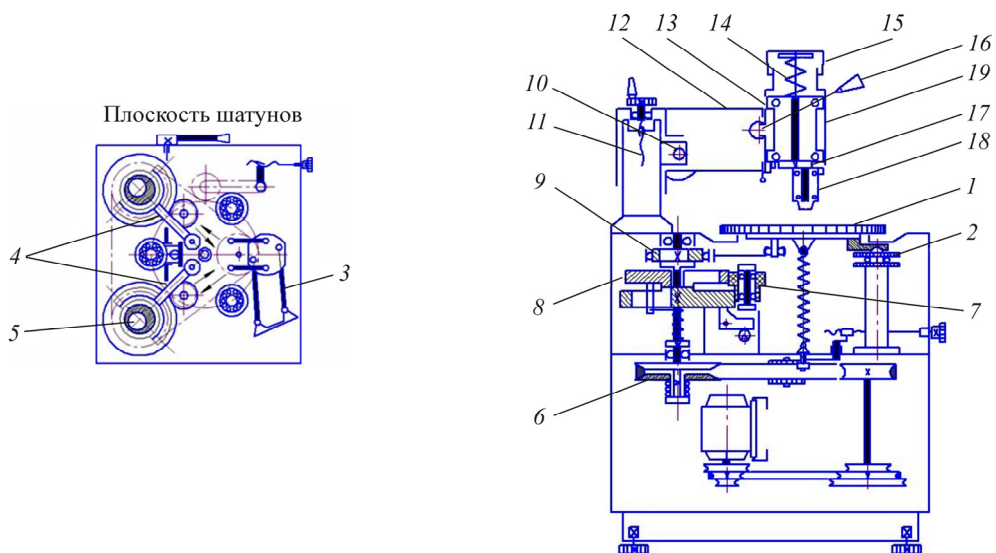


Рис. 8. Кинематическая схема станка «Растр 350»

Нагружающее устройство 19 установлено на поворотном кронштейне 12. В зависимости от высоты обрабатываемой детали ее положение регулируется винтом 11, а зажим на колонне производится дифференциальным винтом 10. В качестве силового элемента применена пружина 14 с регулируемым гайкой 15 усилием прижима. Центральный вал 17 посажен на подшипниках зафиксированной от поворота пиноли 13, нижняя часть которой образует зубчатый венец планетарного механизма. Сателлитом является надетое на кривошип вала 17 подвижное колесо 18, заканчивающееся шаровой опорой. Поворотом рукоятки 16 устройство опускается в рабочее положение. В конце хода шаровая опора стыкуется с гнездом кассеты и передает необходимую нагрузку на обрабатываемые детали. Вследствие того, что шаровая опора смещена относительно оси вращения вала 17, при движении притира силы абразивного трения деталей о притир создают крутящий

момент, поворачивающий кассету с деталями или деталь в направлении, разрешенном муфтой свободного хода.

Таким образом, кассета с деталями одновременно совершает вращательное движение вокруг двух осей – сателлита 18 и вала 17 [5], благодаря этому точки кассеты движутся по гипоциклоидам, вид которых определяется параметрами планетарного механизма и расстоянием b точки от центральной оси:

$$x = (R - r) \cos(\omega t) + (b - C) \cos\left(\frac{R - r}{r} \omega t\right),$$
$$y = (R - r) \sin(\omega t) - (b - C) \sin\left(\frac{R - r}{r} \omega t\right),$$

где R и r – радиусы делительных окружностей зубчатого венца и сателлита; ω – угловая частота вращения центрального вала; t – время; b – расстояние движущейся точки кассеты с деталями от центральной оси нагружающего устройства; C – величина смещения оси центрального вала нагружающего устройства от оси сателлита.

Станок «Растр 350» используется в индивидуальном и серийном производстве, характеризующемся частой сменой небольших партий деталей и их широкой номенклатурой. Достижимая на станке величина шероховатости доведенной поверхности $Ra = 0,16 \dots 0,004$ мкм в зависимости от зернистости применяемого абразива, а неплоскостность поверхности – 0,3–1 мкм в зависимости от размеров обрабатываемых деталей.

В станке с поступательным рабочим движением скорости резания и пути трения всех точек притира одинаковы, что позволяет использовать всю его рабочую поверхность. Однако на этих станках трудно обеспечить равномерное распределение абразивного материала и исключить локальные выработки даже при полной загрузке рабочей поверхности притира обрабатываемыми деталями. По результатам экспериментальных и теоретических исследований кинематики плоскоподводных станков можно сформулировать следующие основные требования к рабочему движению притира:

- 1) наличие неповторяющегося мультидвижения;
- 2) образование изотропной сетки криволинейной траектории;
- 3) равенство путей трения всех точек притираемой поверхности;

4) возможность регулирования параметров траектории рабочего движения.

Преимущества вращательного и поступательного движения удачно реализуются в станках с циклоидальной траекторией рабочего движения, которая образуется путем суммирования круговых колебаний и медленного вращения притира. Однако в этих станках не представляется возможным целенаправленно регулировать параметры траектории, например плотность сетки следов обработки. Вместе с тем экспериментально установлено, что циклоидальная траектория рабочего движения по технологическим возможностям близка к растровой. В таблице приведены результаты экспериментов по влиянию вида траектории на величину шероховатости поверхности R_a и скорость съема материала ν в относительных величинах. Значения R_a и ν , полученные при растровой доводке, приняты за 1.

Влияние вида траектории рабочего движения инструмента на величину шероховатости поверхности R_a и скорости съема материала ν

| Показатели процесса доводки | Вид траектории движения инструмента (притир) | | | | |
|-----------------------------|--|--------|------------|----------|-------|
| | Линия | Эллипс | Окружность | Циклоида | Растр |
| R_a | 3 | 2,5 | 2 | 1,3 | 1 |
| ν | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 1,1 | 1 |

Свойства циклоидальных траекторий исследованы с помощью модели в среде MathCAD и экспериментально подтверждены на опытной установке для доводки плоскостей, позволяющей регулировать параметры циклоидальной траектории рабочего движения притира. На рис. 9 представлена схема доводки на опытной установке, где ω – частота круговых колебаний притира; e – амплитуда круговых колебаний; n_n – частота вращения притира; n_d – частота вращения обрабатываемой детали; F – усилие прижима обрабатываемой детали.

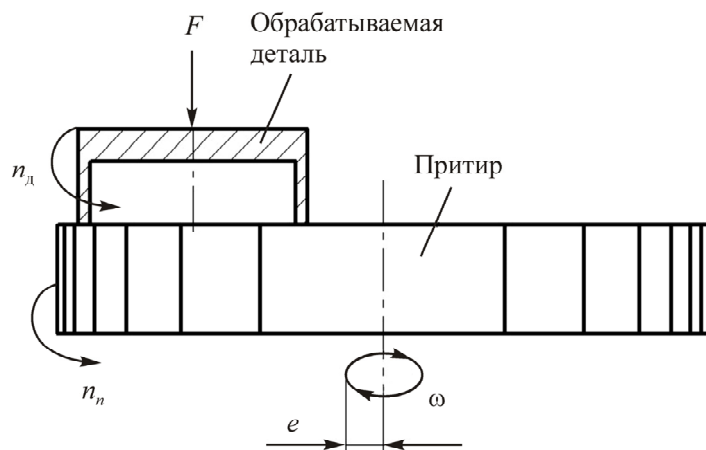


Рис. 9. Схема доводки

Главным движением притира, осуществляющим сьем металла с обрабатываемой детали, является поступательное движение по круговой траектории диаметром $2e$ с частотой ω . Дополнительно к этому поступательному движению притиру сообщается медленное вращательное движение с регулируемой частотой n_n . При такой кинематике все точки притира перемещаются по циклоидальным траекториям практически с одинаковой скоростью, что положительно влияет на равномерность износа рабочей поверхности притира [19]. Кроме того, за счет свободного вращения детали или кассеты с деталями вокруг своей оси реализуется: во-первых, эффект правильного кольца, способствующий равномерному износу притира, во-вторых, эффект доводки по способу свободного притира, отличительной чертой которого являются высокие показатели по точности обработки и шероховатости поверхности. Такая кинематика при использовании соответствующих инструментов (притиров и абразивов) позволяет обеспечивать величину шероховатости обработанной поверхности также в нанометровом диапазоне.

На основании анализа литературных данных и проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Абразивная доводка – сложный процесс, при котором имеют место как механические явления (микрорезание, пластическое деформирование и т.д.), так и химические явления (образование окисных пленок и адсорбционных слоев).

2. Доводкой по сравнению с другими методами окончательной обработки, можно получить высокую точность геометрической формы, размеров и малую шероховатость поверхности.

3. Среди рассмотренных плоскодоводочных станков имеются станки с жесткой кинематической связью и станки с фрикционной связью между заготовками и инструментом (притиром). Наиболее универсальными и распространенными плоскодоводочными станками являются станки с вращающимися притирами, но вследствие большого перепада скоростей вращения различных участков притира они не гарантируют стабильно высокого качества обработки. Также описаны станки с колебательным движением притира.

4. Представлены разработанные и изготовленные в ПНИПУ плоскодоводочные станки модели «Растр». Конструкция станков позволяет бесступенчато регулировать параметры траектории движения притира (инструмента). Станки серии «Растр» позволяют обрабатывать как одиночные детали, так и партии деталей в многоместных приспособлениях, а также осуществлять точную правку доводочных дисков. Из-за сложности сетки и неповторяемости линий, из которых состоит траектория инструмента, каждое режущее зерно всё время проходит по новому месту обрабатываемой поверхности и не оставляет на ней глубоких следов, благодаря чему уменьшается шероховатость поверхности и повышается точность геометрической формы обработанных поверхностей.

5. Приведены результаты практических экспериментов по влиянию вида траектории инструмента (притира) на величину шероховатости поверхности и скорость съема материала в относительных величинах.

Список литературы

1. Кремень З.И., Павлючук А.И. Абразивная доводка. – Л.: Машиностроение, 1967. – 114 с.
2. Притирка и доводка [Электронный ресурс]. – URL: <http://modern-machines.com/speczialnye/novejshie-vidy-obrabotki-metallov/pritirka-i-dovodka/108-pritirka-i-dovodka.html> (дата обращения: 20.02.2017).
3. Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Металлорежущие станки / под ред. А.И. Кочергина; Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т. – Минск, 2001. – 446 с.
4. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

5. Некрасов В.П. Управляемая авторотация деталей на плоскодвигательном станке // Повышение качества деталей на основе совершенствования окончательных методов обработки: межвуз. сб. научн. тр. – Пермь, 1977. – № 208. – С. 62–68.
6. PETER WOLTERS. – URL: <http://www.peter-wolters.com/machines/single-wheel-processing/3r-4r> (дата обращения: 15.09.2016).
7. Lapmaster's lapping. – URL: <http://www.lapmaster.com/machinery/lapping-polishing-machinery/bench-top-single/default.html> (дата обращения: 15.09.2016).
8. EAMTM (European Association of Machine Tool Merchants vzw). – URL: <http://www.machinedeal.com/de/cat/schleif-hon-und-poliermaschinen/lappmaschinen> (дата обращения: 15.09.2016).
9. LLC SYNERCON. – URL: http://www.synercon.ru/catalog/remet/etrographicheskoe_oborudovanie/metallograficheskie_shlifovalnopolirovalnye_stanki_ls (дата обращения: 15.09.2016).
10. Некрасов В.П. Исследование процесса растровой доводки и закономерностей формирования плоских поверхностей: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1971. – 140 с.
11. Машиностроение [Электронный ресурс]. – URL: <http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/02/dovodka-pritirka-ploskix-poverxnostej> (дата обращения: 15.09.2016).
12. Серебренник Ю.Б., Мушак А.С. Вибрационная доводка плоских деталей алмазными пастами // Современные организационные технологические и конструкторские методы управления качеством: сб. науч. тр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 75–83.
13. Тамбулатов Б.Я. Доводочные станки. – М.: Машиностроение, 1980. – 160 с.
14. Вибрационная притирка детали [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.stroi-blok.ru/?p=502> (дата обращения: 15.09.2016).
15. Некрасов В.П., Муратов Р.А. Станки с растровой кинематикой для финишной обработки поверхностей постоянной кривизны // Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством: сб. науч. тр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 96–115.
16. Технология и оборудование с растровой кинематикой для формирования шероховатости поверхностей постоянной кривизны в нанометровом интервале / А.М. Ханов, Р.А. Муратов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // СТИН. – 2010. – № 2. – С. 34–35.
17. Управление траекторией рабочего движения при доводке плоскостей / А.М. Ханов, В.А. Иванов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 1–3. – С. 667–669.
18. Nanoroughness produced by systems with raster kinematics on surfaces of constant curvature / А.М. Khanov, R.A. Muratov, K.R. Muratov, E.A. Gashev // Russian Engineering Research. – 2010. – Т. 30, № 5. – С. 528–529.
20. Горбач В.Л. Кинематика рабочих органов оптических шлифовально-полировальных станков. – М.: Оборонгиз, 1958. – С. 120.

References

1. Kremen' Z.I., Pavliuchuk A.I. Abrazivnaia dovodka [Abrasive operational development]. Leningrad, Mashinostroenie, 1967, 114 p.
2. Pritirka i dovodka [Grinding in and operational development], available at: <http://modern-machines.com/speczialnye/novejshie-vidy-obrabotki-metallov/pritirka-i-dovodka/108-pritirka-i-dovodka.html> (accessed 20 February 2017).
3. Iashcheritsyn P.I., Efremov V.D. Metallorzhushchie stanki [Metal-cutting machines]. Ed. A.I. Kochergina. Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi agrarnyi tekhnicheskii universitet, 2001, 446 p.
4. Orlov P.N. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detalei metodami dovodki [Technological support of quality of details by operational development methods]. Moscow, Izdatel'stvo Mashinostroenie, 1988, 384 p.
5. Nekrasov V.P. Upravliaemaia avtorotatsiia detalei na ploskodovodochnom stanke [The operated autorotation of details on the ploskodovodochny machine]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov № 208. Povyshenie kachestva detalei na osnove sovershenstvovaniia okonchatel'nykh metodov obrabotki*. Perm', 1977, pp. 62–68.
6. PETER WOLTERS, available at: <http://www.peter-wolters.com/machines/single-wheel-processing/3r-4r>. (accessed 15 September 2016).
7. Lapmaster's lapping, available at: <http://www.lapmaster.com/machinery/lapping-polishing-machinery/bench-top-single/default.html> (accessed 15 September 2016).
8. EAMTM (European Association of Machine Tool Merchants vzw), available at: <http://www.machinedeal.com/de/cat/schleif-hon-und-poliermaschinen/lappmaschinen/> (accessed 15 September 2016).
9. LLC SYNERCON, available at: http://www.synercon.ru/catalog/remet/etrographicheskoe_oborudovanie/metallograficheskie_shlifovalnopolirovalnye_stanki_ls (accessed 15 September 2016).
10. Nekrasov P. Issledovanie protsessa rastrovoy dovodki i zakonomernostei formirovaniia ploskikh poverkhnostei [Research of process of raster operational development and regularities of formation of flat surfaces]. Dissertatsionnaia rabota. Perm', 1971, 140 p.
11. Mashinostroenie, available at: <http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/02/dovodka-pritirka-ploskix-poverkhnostej> (accessed 15 September 2016).
12. Serebrennik Iu.B., Mushak A.S. Vibratsionnaia dovodka ploskikh detalei almaznymi pastami [Vibration operational development of flat details diamond pastes]. *Sovremennye organizatsionnye tekhnologicheskie i konstruktorskie metody upravleniia kachestvom: Sbornik nauchnykh trudov*. Perm', Izdatel'stvo Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, 2006, pp. 75-83.
13. Tambulatov B.Ia. Dovodochnye stanki [Honing machines]. Moscow, Izdatel'stvo Mashinostroenie, 1980, 160 p.
14. Vibratsionnaia pritirka detail, available at: <http://www.stroi-blok.ru/?p=502> (accessed 15 September 2016).
15. Nekrasov V.P., Muratov R.A. Stanki s rastrovoy kinematikoi dlia finishnoi obrabotki poverkhnostei postoiannoi krivizny [Machines with raster kinematics for finishing processing of surfaces of constant curvature]. *Sbornik nauchnykh trudov "Sovremennye organizatsionnye tekhnologicheskie i konstruktorskie metody upravleniia kachestvom"*.

Perm': Izdatel'stvo Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, 2006, pp. 96–115.

16. Khanov A.M., Muratov R.A., Muratov K.R., Gashev E.A. Tekhnologiya i oborudovanie s rastrovoy kinematikoi dlia formirovaniia sherokhovatosti poverkhnostei postoiannoi krivizny v nanometrovom interval [Technology and the equipment with raster kinematics for formation of a roughness of surfaces of constant curvature in a nanometer interval]. *Stanki i instrument*, no. 2, 2010, pp. 34–35.

17. Khanov A.M., Ivanov V.A., Muratov K.R., Gashev E.A. Upravlenie traektoriei rabocheho dvizheniia pri dovodke ploskosti [Management of a trajectory of labor movement at operational development of the planes]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 1–3, pp. 667–669.

18. Khanov A.M., Muratov R.A., Muratov K.R., Gashev E.A. Nanoroughness produced by systems with raster kinematics on surfaces of constant curvature. *Russian Engineering research*. 2010, vol. 30, no. 5, pp. 528–529.

19. Gorbach V.L. Kinematika rabochikh organov opticheskikh shlifoval'no-poliroval'nykh stankov [Kinematics of working bodies of optical grinding and polishing machines]. Moscow, Oborongiz, 1958, 120 p.

Получено 28.02.2017

Об авторах

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой инновационных технологий в машиностроении Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Муратов Карим Равилевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий, материалов и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: karimur_80@mail.ru.

About the authors

Vladimir F. Makarov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chair of Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University.

Karim R. Muratov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: karimur_80@mail.ru.