

3. Цаплин, А. И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья / А. И. Цаплин. — Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1995. — 238 с.

**ВАВЕЛЬ Дмитрий Леонидович**, аспирант кафедры «Динамика и прочность машин».

**УДК 621.923.5**

**ШЕВЕЛЕВ Николай Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе.

Адрес для переписки: [vdiman@list.ru](mailto:vdiman@list.ru)

Статья поступила в редакцию 21.01.2013 г.

© Д. Л. Вавель, Н. А. Шевелев

**И. И. КОШУКОВ**

**Омский государственный технический университет**

## ПРЕЦИЗИОННАЯ ДОВОДКА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Проведено исследование процесса финишной обработки плоскопараллельных поверхностей высокоточных деталей. Выведена формула математической модели равномерного износа рабочей поверхности притира. Представлены шаги проектирования реального устройства для доводки плоскопараллельных поверхностей. Даны рекомендации практического применения материалов исследования в рамках современного производства.**

**Ключевые слова:** прецизионная доводка, математическая модель, удельная работа, масштабный фактор.

Тема статьи относится к области машиностроения и касается исследования процесса абразивной доводки плоскопараллельных поверхностей, принадлежащих деталям плунжерного насоса и агрегатам топливной системы современных летательных аппаратов.

Пары трения плунжерных насосов работают в экстремальных условиях высоких скоростей и высоких давлений. Характерным отказом работы насосов являются запредельный износ трущихся поверхностей, повышенная утечка топлива, избирательный перенос металла. Причина отказов чаще всего кроется в качестве обработки поверхностей трения.

Современная техника требует ужесточения технических требований к деталям топливной аппаратуры. Точность геометрических форм в пределах 1,0 мкм становится нормой производства и выдвигает встречные требования технологической оснащенности, т.е. создания оборудования, позволяющего выполнять поставленные задачи.

Для достижения цели обычно используют абразивный способ доводки. Обработку плоскопараллельных поверхностей производят на станках с двумя дисковыми притирами. Детали располагают между притирами на плоских кольцевых дорожках и сообщают им относительное перемещение, состоящее из главного и вспомогательного движения. Главное движение определяет интенсивность съема припуска и формирует геометрию рабочей поверхности притира. В зоне обработки происходит взаимная притирка поверхностей детали и притира. Процесс протекает в абразивной среде в режиме давления, относительного перемещения и длительности контакта. При этом абразивные зерна выполняют работу, которая затрачивается как на снятие припуска, так и на износ рабочей поверхности притира. Эта

работа определяется зависимостью, которая в научно-технической литературе общепризнанно выражается формулой Престона:

$$A = f P V T, \quad (1)$$

где  $A$  — полная работа абразивных зерен, затраченная на снятие припуска детали и на износ рабочей поверхности притира,  $f$  — коэффициент трения,  $P$  — рабочее давление абразивных зерен на контактирующих поверхностях детали и притира,  $V$  — средняя скорость относительного перемещения детали и притира,  $T$  — время контакта трущихся поверхностей.

Формообразование плоской поверхности детали происходит методом копирования рабочей поверхности притира, поэтому конечный результат доводки зависит от состояния его рабочей поверхности, особенно в завершающей стадии цикла обработки. На этом этапе вступает в силу известная аксиома: обрабатываемая поверхность детали есть зеркало рабочей поверхности притира, т.е. равномерный износ рабочей поверхности притира является определяющим элементом технологического процесса. Создание «идеальной» исходной формы рабочей поверхности притира и сохранение ее на протяжении всего цикла доводки становится первоочередной задачей технологического процесса.

Однако уравнение формулы (1) в таком виде не отражает качественную сторону процесса. Работа сил трения, затраченная на снятие припуска и износ притира, выражает количество снятого материала по принципу где больше, где меньше, поэтому не может отвечать требованиям равномерного износа притира. Равномерному износу противодействует ряд различных факторов, подразделяющихся на технологические, кинематические, динамические и масштабные факторы. В исследуемом процессе, выра-

женном формулой (1), к технологическим факторам относятся свойства (f) исходных материалов притира, детали, абразива и других материалов, участвующих в процессе обработки. Кинематические представляют натуральные величины (P, V) режима обработки. Динамические факторы представляют закон изменения кинематических параметров движения, а масштабные факторы (T) заложены в соотношениях форм и линейных размеров контактирующих поверхностей детали и притира. Различные сочетания форм расположения деталей образуют на рабочей поверхности притира «зоны отдыха», конфигурация которых определяет длительность контакта детали и притира. Все перечисленные факторы размещены в правой части уравнения (1) под видом параметров режима обработки. Вредные факторы отличаются функцией, зависящей от координат расположения расчетных точек контактирующих поверхностей.

Качественную сторону процесса доводки выражает работа, отнесенная к единице площади, т.е. удельная работа. Неизменная величина удельной работы, затраченная на износ рабочей поверхности притира в любой ее точке, характеризует течение процесса доводки в режиме равномерного износа притира. Для соответствующего преобразования формулы достаточно разделить левую и правую часть уравнения (1) на площадь S рабочей поверхности притира:

$$A/S = f \cdot P/S \cdot V \cdot T.$$

В упрощенном варианте формула примет вид:

$$\Delta A = f \cdot p \cdot V \cdot T, \quad (2)$$

где  $\Delta A$  — удельная работа сил трения, затраченная на износ рабочей поверхности притира.

$p$  — удельное давление.

По сделанному заключению удельная работа  $\Delta A$  является величиной постоянной ( $\Delta A = \text{const}$ ) на протяжении всего цикла доводки. Соответственно правая часть уравнения, выраженная произведением параметров режима обработки ( $f \cdot p \cdot V \cdot T$ ), тоже будет величиной постоянной. Но не исключено, что параметры режима обработки могут быть величинами переменными, и превратятся в комбинацию вредных факторов. Устранить неудобные факторы целесообразно радикальным путем, т.е. используя метод идеализации технологического процесса, схожий с приемом доказательства «от противного». Для этого технологический процесс условно принимается как идеальный. А в идеальном процессе нет и не может быть места вредным факторам, т.е. присутствуют только факторы, благоприятствующие качеству. В противном случае удельная работа  $\Delta A$  превращается в функцию, т.е. в переменную величину (var), что противоречит условию равномерного износа притира. Значит, уравнение (2), записанное в виде:

$$\Delta A(\text{const}) = f(\text{const}) \cdot p(\text{const}) \cdot V(\text{const}) \cdot T(\text{const}) \quad (3)$$

является справедливым и может называться математической моделью равномерного износа рабочей поверхности притира.

Уравнение формулы (3) отображает идеальные условия процесса доводки, которые позволяют не только обеспечить равномерный износ притира, но и гарантированно оформить обрабатываемую поверхность детали в пределах допустимой величины отклонения от плоскостности.

Может последовать вопрос: а что будет, если правая часть уравнения ( $f \cdot p \cdot V \cdot T$ ), как комбинация переменных режимов (вредных факторов) представит величиной постоянной?

Такое положение вписывается в уравнение математической модели, но трудность решения задачи остается на прежнем уровне.

Возможность практического осуществления «идеального» процесса прецизионной доводки в соответствии с условиями формулы (3) рассмотрена на примере проектирования специального устройства для доводки плоских поверхностей опорной шайбы плунжерного насоса (рис. 1). Первые шаги проекта сделаны в сторону поиска технических решений, удовлетворяющих условиям каждого члена уравнения математической модели. Рассмотрим их поочередно:

$\Delta A = \text{const}$  — исходное условие проекта,

$f = \text{const}$  — т.к. зависит только от постоянных характеризующих величин абразивного зерна, свойств материалов, СОЖ и других положительных факторов.

$p = \text{const}$  — т.к. распределение абразивных зерен по рабочей поверхности притира, при постоянной норме расхода, принято считать равномерным [1, с. 151].

$V = \text{const}$  — т.к. в составе привода главного движения используется механизм плоскопараллельного перемещения, т.е. двойной шарнирный параллелограмм, который обеспечивает перемещение детали по одинаковым круговым траекториям с одинаковой линейной скоростью [2].

$T = \text{const}$  — т.к. исключается вредное влияние масштабного фактора на качество обработки за счет применения новых технических решений [3], разработанных на основе кратного соотношения взаимодействующих площадей обрабатываемой поверхности детали и рабочей поверхности притира. Рассмотрим несколько возможных вариантов таких соотношений, удовлетворяющих требованию математической модели:

1. Рабочая поверхность притира разделена на кольцевые дорожки различной ширины, рассчитанной на основе пропорционального отношения работ, затраченных на взаимный износ притира и детали [3]. Физический смысл состоит в том, что детали равномерно распределены по мнимой окружности, которая делит рабочую площадь притира на две равные части. Кратность отношения площадей контактирующих поверхностей детали и притира по обе стороны разделительной линии согласно описанию является гарантией выполнения требуемых характеристик качества в пределах допустимой величины.

2. Рабочая поверхность притира выполнена в виде набора элементов. Все элементы идентичны по форме с обрабатываемой поверхностью детали и равномерно расположены по окружности среднего диаметра кольцевой дорожки притира. Кратность отношения площадей обрабатываемой поверхности детали и рабочей поверхности притира, согласно описанию [4], является признаком равномерного износа каждого элемента и всей рабочей поверхности «в целом».

3. Кольцевая дорожка притира выполнена в форме участка торовой поверхности.

В этом случае происходит линейный контакт притира и детали в плоскости, совпадающей с плоскостью, например, боковой образующей тора. Длительность линейного контакта притира с поверхностью детали автоматически уравнивается. Такое взаимодействие детали и притира позволяет под-

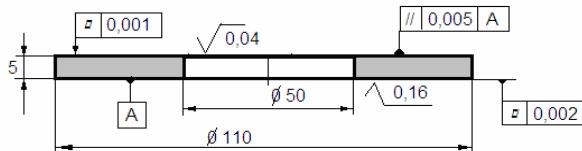


Рис. 1. Опорная шайба

держивать исходную форму рабочей поверхности притира в «идеальном» состоянии на протяжении всего цикла доводки.

Результаты всех перечисленных вариантов дают основание считать удельную работу « $\Delta A$ » сил трения, отнесенную к износу притира, величиной постоянной (const) в любой расчетной точке рабочей поверхности притира. Данный вывод звучит как аксиома равномерного износа притира и ставит утверждительную точку на правомерности существования «идеального» способа доводки.

**Вывод:** Теоретически все условия для равномерного износа притира выполнимы. Практическое изготовление устройства возможно.

**Устройство для плоскопараллельной доводки деталей.** На основе теоретических рассуждений и проведенного анализа существующего положения в области прецизионной доводки плоских поверхностей, представлен к рассмотрению проект совершенно нового устройства, предназначенного для выполнения финишных операций доводки плоскопараллельных поверхностей, отвечающих требованиям современного производства.

На рис. 2 схематично изображено устройство, на рис. 3 — то же, вид сверху (верхний притир не показан); на рис. 4 — траектория движения произвольной точки «В» обрабатываемой детали в пределах цикла доводки. Верхний и нижний притиры 1 имеют дисковую форму с рабочей поверхностью в виде плоской кольцевой дорожки. Соосное расположение дорожек обеспечивает штырь 2, соединяющий оба притира через центральное отверстие. Зазор в соединении позволяет верхнему притиру перемещаться в вертикальном направлении и самоустанавливаться по обрабатываемым поверхностям деталей 3, размещенным в гнездах дискового сепаратора 4. Штырь закреплен на плоском столе 5. Собранные пакетом притиры, детали, сепаратор и стол, размещены внутри цилиндрической полости (чаши) шатуна 6 и установлены на горизонтальной плоскости основания 7. Шатун соединен с основанием двойным шарнирным параллелограммом 8, и шарнирно соединен с приводным валом 9 через регулируемый эксцентрик 10. Приводной вал и электропривод 11 смонтированы внутри основания и соединены клиновременной передачей 12. Для поднятия верхнего притира, при загрузке и выгрузке деталей, а также для изменения рабочего давления, служит подъемно-нагружающее устройство 13.

Работоспособность устройства определяет зазор « $\delta$ », с которым сепаратор размещен внутри цилиндрической полости шатуна. Наиболее оптимальная величина зазора составляет 0,5–1,5 мм. Обрабатываемые детали размещают в гнездах сепаратора и поджимают верхним притиром. Главное доводочное движение осуществляется от электропривода 11, который вращает приводной вал 9 и эксцентрик 10. Удвоенная величина эксцентрикитета определяет ход шатуна 6 в движении по окружности с радиусом  $R = (0–12)$  мм. Двойной шарнирный параллелограмм 8 исключает

возможность углового перемещения чаши шатуна 6, вынуждая его к параллельному перемещению по круговой траектории. По этой же траектории дисковый сепаратор 4 и детали 3, помещенные внутри полости шатуна, совершают круговое движение, являющееся главным движением доводки.

Кроме главного доводочного движения, детали совершают вспомогательное движение вдоль рабочего пояска притира. Перемещение осуществляется сепаратором 4 при его качении без скольжения по внутренней цилиндрической поверхности чаши шатуна 6. Движущей силой является сила трения между деталями и притиром. Результирующая этих сил, приведенная к центру сепаратора, создает относительно точки контакта «А» сепаратора с чашей шатуна крутящий момент. За один оборот приводного вала направление результирующей силы плавно меняется на 360° и обкатывает сепаратор по внутренней поверхности чаши шатуна. Разность длин окружностей контактирующих поверхностей чаши и обода сепаратора определяет величину окружной скорости на ободе сепаратора, которую условно можно считать продольной подачей детали относительно притира за один оборот приводного вала. В практическом применении продольную подачу « $S$ » удобнее выразить через величину зазора между цилиндрической полостью чаши шатуна 6 и ободом сепаратора 4, которая равна отношению продольной подачи к арифметической постоянной « $\pi$ » (3,14), т.е.

$$δ = S/π \text{ или } S = π·δ.$$

При зазоре, равном 1 мм, подача  $S = 3,14 \text{ мм/об. коленчатого вала}$ , без учета величины проскальзывания сепаратора. В приближенном варианте, зазору в 1 мм соответствует подача 3 мм; зазору 2 мм — подача 6 мм; 3 мм — 9 мм на один оборот и т.д. По такому же закону совершается другое вспомогательное движение — вращение детали в гнезде сепаратора. Величина зазора, в этом случае, определяет окружную скорость вращения детали в гнезде сепа-

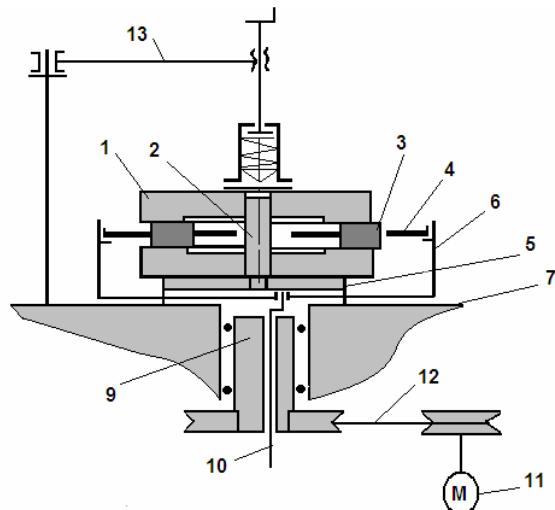


Рис. 2. Схема устройства плоскопараллельной доводки деталей:  
 1 — притир верхний, 2 — штырь,  
 3 — обрабатываемая деталь, 4 — сепаратор, 5 — стол,  
 6 — шатун, 7 — основание, 8 — параллелограмм,  
 9 — вал главного привода,  
 10 — эксцентрик, 11 — эл. привод,  
 12 — клиновременная передача,  
 13 — подъемно-нагружающее устройство

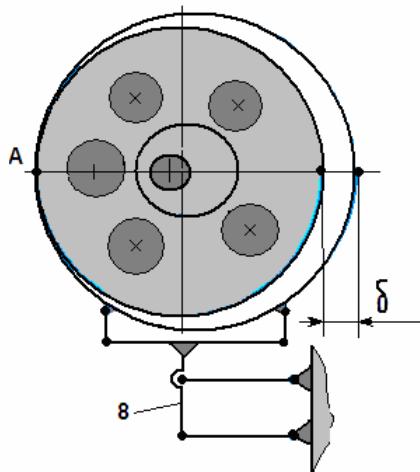


Рис. 3. Схема устройства (вид сверху).  
8 – двойной шарнирный параллелограмм

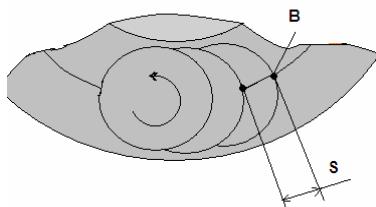


Рис. 4

ратора или окружную подачу в мм/оборот коленчатого вала.

В результате обработки на поверхности детали остается сетка микрорельефа, представляющая картину наложения бесчисленного множества круговых штрихов, так называемых мерцающих вихрей. Неповторимость траекторий, многократное пересечение штрихов, непрерывная смена направления доводочного движения способствуют интенсивному формированию шероховатости обрабатываемой поверхности детали в любых пределах. При этом шарнированные в притире абразивные зерна работают всеми гранями выступающих вершин, повышая свою режущую способность. Доводочная операция, про-

текающая при постоянных скоростях резания и постоянных ускорениях на протяжении всего цикла доводки, при отсутствии больших инерционных сил движущихся частей устройства, обеспечивает плоскость и параллельность обрабатываемых поверхностей детали в пределах 1 – 0,3 мкм. Исходная форма рабочей поверхности притира, стремящейся в своем пределе к идеалу, является признаком автоматической правки притира обрабатываемыми деталями в процессе их изготовления.

Проект устройства, воплощенный в металле может быть использован в производстве плунжерных насосов, точнее на операциях доводки плоских торцов опорных и прижимных шайб, плоских золотников, корпуса насоса, а также для обработки плоских поверхностей контрольно-измерительного инструмента.

**Возможные неисправности устройства.** В данном устройстве нижний притир имеет идеальные условия для сохранения исходной формы рабочего пояска, т.к. не подвержен действию внешних сил, кроме сил трения. Верхний притир подвижен, поэтому является наиболее уязвимым звеном структурной схемы особенно в местах подвижных соединений (связей). Случайное действие внешних сил может стать источником дестабилизации процесса доводки и причиной неравномерного износа притира. Рассмотрим некоторые из них (рис. 5):

1. Опрокидывающий момент  $M$  от действия сил трения и нормального рабочего давления может возникнуть, как следствие:

а) из-за несовпадения опорной точки «А» с плоскостью действия сил трения  $F$ .

$$M = F \cdot \Delta A,$$

где  $\Delta A$  — смещение точки «А» с плоскостью действия сил трения  $F$ ;

б) из-за смещения опорной точки «Б» с центральной оси притира.

$$M = P \cdot \Delta B,$$

где  $\Delta B$  — смещение точки «Б» с оси притира;

в) из-за износа центрального отверстия притира, когда зазор « $a$ » превысит конструктивный зазор « $b$ » между колпаком 3 и винтом 4, т.е.  $(a > b)$ .

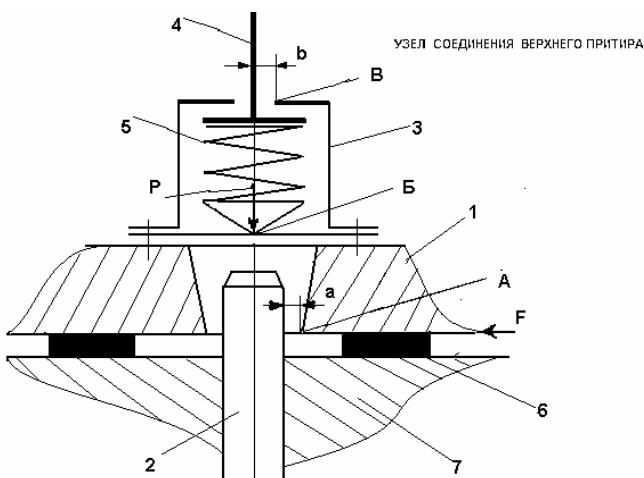


Рис. 5. Схема действия сил в узле верхнего притира.  
Р – рабочее давление, F – сила трения

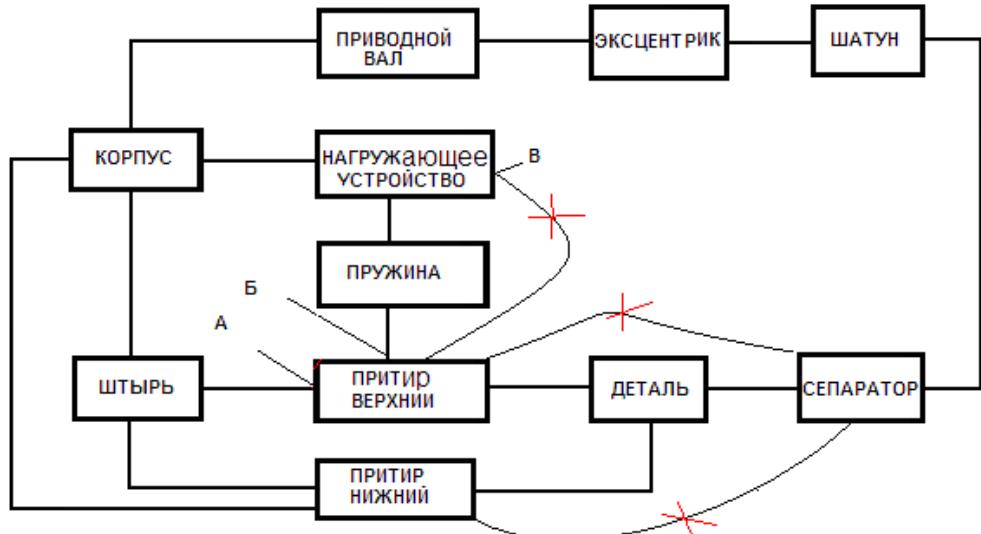


Рис. 6. Структурная схема устройства

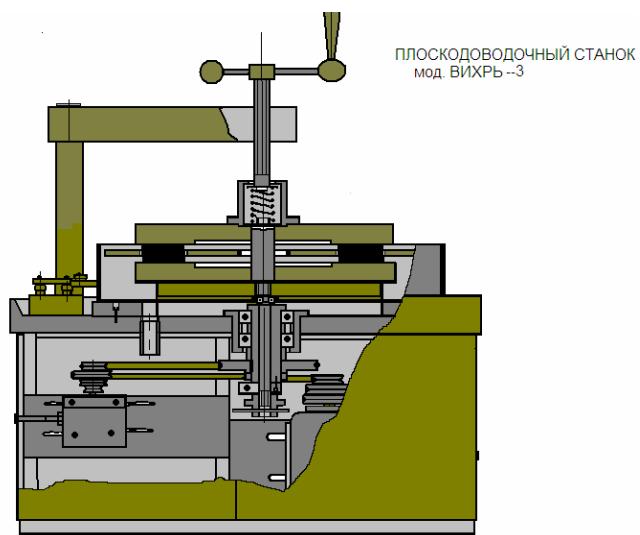


Рис. 7. Плоскодоводочный станок

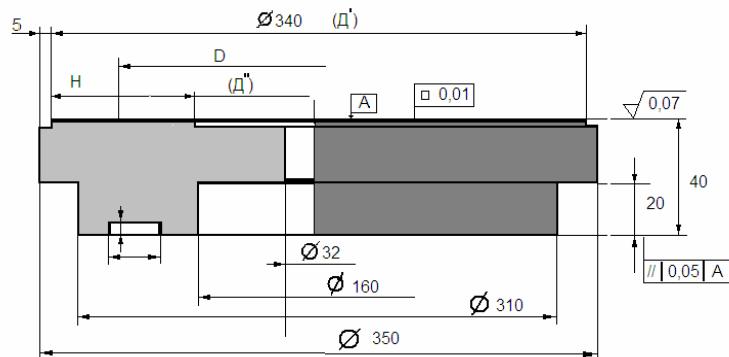


Рис. 8. Притир нижний

$$M = F \cdot \Delta B,$$

где  $\Delta B$  — удаленность точки «B» от плоскости действия сил трения «F».

## 2. Случайный контакт притира с сепаратором: а) подныривание сепаратора под деталь (тонкие

- б) горбатый сепаратор,

б) горбатый сепаратор,

в) перекос базовых полочек сепаратора.  
3. Колебание чаши шатуна в вертикальной плоскости:

а) износилась плоская опора шатуна  
б) износ шарниров параллелограмма.

4. Неравномерное распределение деталей по дуге разделительной линии равновеликих площадей рабочей поверхности притира:

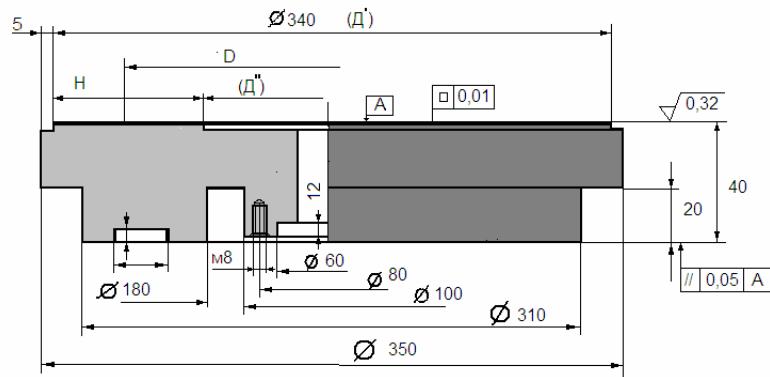


Рис. 9. Притир верхний (заготовка)

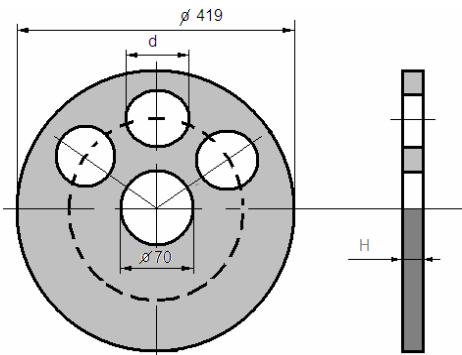
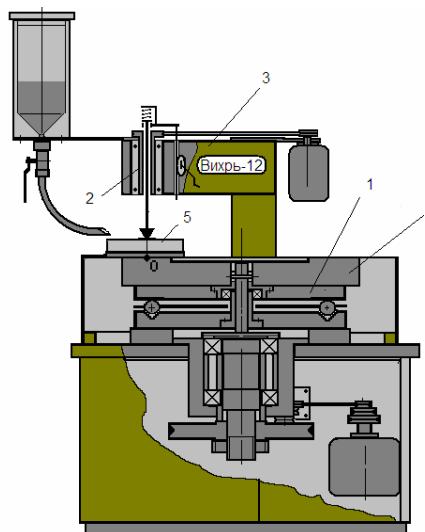


Рис. 10. Сепаратор

Рис. 11. Станок для правки дисковых притиров.  
1 — стол, 2 — шпиндель, 3 — траперса, 4 — притир, 5 — алмазный круг

а) ошибка в расчетах диаметра расположения базовых отверстий сепаратора,

б) подмена сепаратора.

Опрокидывающий момент «М», как правило, увеличивает удельное давление на периферии верхнего притира. Согласно уравнению (3), периферийная часть верхнего притира будет изнашиваться больше. Энергия случайных сил не исчезает бесследно, а через связующее звено (деталь) воздействует на нижний притир, увеличивая давление в момент движения детали к центру притира. Рабочая поверхность верхнего притира в этих условиях при-

нимает выпуклую форму, а нижнего притира — вогнутую. В комбинации с круговыми перемещениями деталей, рабочая поверхность притиров превращается в концентрические сферические поверхности, процесс формирования которых пойдет в устойчивом автоматическом режиме. Устранить этот дефект можно, если опрокидывающий момент привести к нулю. Для чего достаточно плечо момента свести к нулю, т.е. опорные точки «А», «Б» совместить с плоскостью действия сил трения «F», т.е. с плоскостью рабочей поверхности притира, что должно быть записано в требованиях технологической наладки.

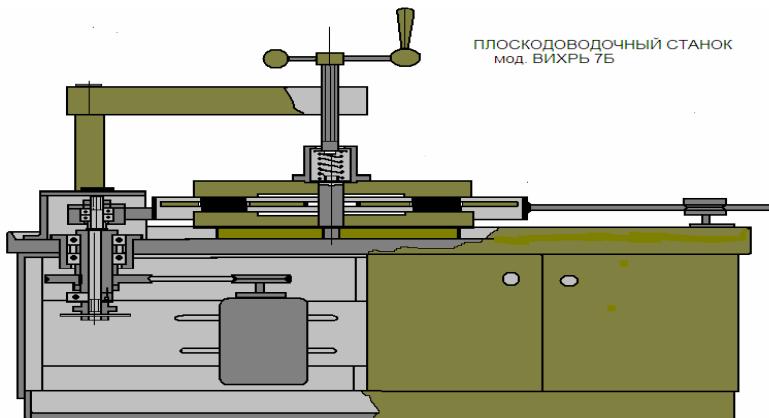


Рис. 12. Плоскодоводочный станок в перспективе развития производства (станок нового поколения)

Случайный контакт притира с сепаратором, устраняется своевременной заменой изношенного сепаратора и наладкой опорных полочек.

Таким образом, действие негативных факторов можно устраниТЬ (приглуШИТЬ) простым соблюде- нием технологической дисциплины, не нарушая ус- ловий «идеального» технологического процесса.

В структурной схеме станка все узлы и ме-ханизмы обозначены прямоугольниками, а промежу-точные связи сплошной линией (рис. 6). Тонкие кри- вые линии свидетельствуют о наличии случайных связей, которые противопоказаны нормальной ра- боте станка. Случайные связи активизируют дейст-вие негативных факторов, ухудшая тем качество обработки. Структурные схемы позволяют предви-деть и предупредить возможное проявление негатив-ных факторов.

Ниже представлены образцы промышленного об-орудования и типовой оснастки, разработанные на базе проведенных исследований: плоскодоводоч-ный станок (рис. 7), притир нижний (рис. 8), притир верхний (рис. 9), сепаратор (рис. 10) и доводочный станок для правки дисковых притиров (рис. 11), а также перспективный вариант плоскодоводочного станка (рис. 12).

#### Библиографический список

1. Куманин, К. Г. Формирование оптических поверхностей / К. Г. Куманин. — М. : Государственное научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ, Москва 1962. — 432 с.
2. Пат. 1252142 Российская Федерация, МПК В 24 В 37/04. Устройство для плоскопараллельной доводки деталей / Кошу-ков И. И. ; заявитель и патентообладатель Кошуков Иван Иосифович. — № 3807454/25-8 ; заявл. 30.10.84 ; опубл. 23.08.86, Бюл. № 31. — 3 с.
3. Пат. 1641594 СССР, МКИ В 24 В 37/04. Способ доводки плоских поверхностей заготовок / Кошуков И. И., Шиманов А. Б. ; заявитель и патентообладатель Кошуков Иван Иоси-фович. — № 4183292/08 ; заявл. 21.01.87 ; опубл. 15.04.91, Бюл. № 14. — 6 с.
4. А. с. 1481035 А СССР, МКИ В 24 В 1/00. Способ преци-зионной доводки плоских поверхностей вращения / Кошуков И. И., Шиманов А. Б. (СССР). — № 4223460/40-08 ; заявл. 21.01.87 ; опубл. 23.05.89, Бюл. № 19. — 4 с.

**КОШУКОВ Иван Иосифович**, инженер-механик.  
Адрес для переписки: [ikoshukov@bk.ru](mailto:ikoshukov@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 08.04.2013 г.  
© И. И. Кошуков

## КНИЖНАЯ ПОЛКА

**Шестель, Л. А. Производство сварных конструкций : конспект лекций. В 3 ч. Ч. 3. Технология изготавления сварных конструкций / Л. А. Шестель ; ОмГТУ. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. — 98 с. — ISBN 978-5-8149-1404-0.**

В конспекте лекций по дисциплине «Производство сварных конструкций» освещены вопросы изготовления сварных конструкций — балочных, рамных, решетчатых, а также труб и трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, корпусных конструкций, сварных деталей и др.

**Добровольский, В. П. Расчет зубчатых и червячных передач : учеб. пособие / В. П. Добровольский ; ОмГТУ. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. — 105 с. — ISBN 978-5-8149-1394-4.**

Пособие по структуре, содержанию и методике ориентировано на программу курса «Детали машин и ос-новы конструирования». Содержит справочные таблицы и данные на основе нормативных документов, принятых в практике конструирования. Для лучшего усвоения материала приведены примеры расчетов.