

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное учреждение
высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»

ТЕХНОЛОГИЯ ФИНИШНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Под общей редакцией
профессора А. П. Минакова

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
<http://e.biblio.bru.by/xmlui/>



Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2016

УДК 621.9

Рекомендовано к изданию Советом Белорусско-Российского университета
«16» октября 2015 г., протокол № 2

Авторы :

*А. П. Минаков, Е. В. Ильюшина, И. Д. Камчицкая,
Е. Н. Антонова, Д. Л. Зайцев, П. В. Афанасьев*

Рецензенты :

д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология машиностроения» Белорусского
национального технического университета *И. А. Каштальян* ;
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Автоматизация технологических
процессов и производств» Могилевского государственного университета
продовольствия *М. М. Кожевников*

Технология финишной упрочняющей пневмовибро-
динамической обработки нежестких деталей : монография /
А. П. Минаков [и др.] ; под общ. ред. проф. А. П. Минакова. –
Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 294 с. : ил.
ISBN 978-985-492-154-9.

Монография посвящена новому направлению в науке, технике
и технологии – отделочно-упрочняющей пневмовибродинамической
обработке нежестких деталей поверхностным пластическим деформи-
рованием.

Предназначена для инженерно-технических работников, а
также для специалистов, занятых проектированием, эксплуатацией и
ремонтom машин; может быть использована студентами, аспирантами
технических специальностей вузов в области машино-, прибор- и
аппаратостроения.

УДК 621.9

ISBN 978-985-492-154-9

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2016

Введение

Развитие современной технологии машиностроения связано с созданием новых материалов и способов механической обработки, что позволяет получить высокие эксплуатационные свойства рабочих поверхностей и существенно увеличить срок службы деталей, механизмов, машин, приборов и аппаратов.

В машиностроении при проектировании изделий наблюдается переход от очень жестких (массивных) деталей к жестким, от жестких – к деталям средней жесткости, далее – малой жесткости и тонкостенным. Чем меньшей жесткостью обладает деталь, тем больше средств затрачивается на ее изготовление, тем выше должны быть физико-механические характеристики материала и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей, которые можно получить с помощью окончательных способов обработки (поверхностного пластического деформирования (ППД), плосковершинного хонингования (ПВХ), лазерной и электронно-лучевой обработки, механотермического формирования поверхностей трения и др.).

Анализ технологий показывает, что ряд нежестких деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (шатун, коленчатый вал, гильза цилиндров, головка блока двигателя) и другие изделия машиностроительного производства, станкостроения, приборостроения отличаются большой трудоемкостью изготовления, а применяемые для некоторых из них процессы хонингования, фосфатирования, электронно-лучевая обработка и другие экологически вредны.

Кроме того, для тяжело нагруженных деталей имеется серьезное отставание по качеству материалов, их совершенствованию и созданию новых. На сегодняшний день невозможно реализовать преимущества как действующих, так и новейших отечественных технологий для повышения ресурса таких деталей по сравнению с мировыми аналогами.

Проблема повышения надежности и долговечности нежестких деталей в работе решена с помощью пневмовибродинамической обработки (ПВДО).

В работе показаны технологические возможности ПВДО, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающие повышение надежности и долговечности деталей ДВС, гидроцилиндров, подшипников качения и скольжения, направляющих поверхностей станин металлорежущих станков, штоков и других деталей.

Благодаря малым силам, создаваемым в процессе ПВДО, и особенностям кинематики деформирующих элементов (шаров) можно

получить оптимальную топографию рабочей поверхности детали с тонкодеформированным поверхностным слоем и малым градиентом сжимающих остаточных напряжений.

Например, импульсно-ударная обработка плоских поверхностей головок блоков, блоков цилиндров ДВС и других деталей позволяет исключить часто оговариваемые предъявляемые к фрезерованной или шлифованной поверхности жесткие технические требования по неплоскостности. При такой обработке обеспечивается приемлемая гидроплотность соединения, может быть снижена трудоемкость механической обработки.

Указания к разработке новой технологии изготовления шатунов, гильз можно использовать для улучшения качества обработки поверхностей основных отверстий шатунов, гильз и повышения КПД и ресурса работы ДВС за счет существенного снижения погрешностей по перекосу и непараллельности осей, повышения контактной жесткости сопрягаемых поверхностей, уменьшения расхода масла на угар и сил трения.

Разработанный способ упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей значительно повышает износостойкость и снижает трудоемкость ремонта направляющих станин станков по сравнению с традиционно применяемыми технологиями.

Перспективными являются новые способы тонкой абразивной пневмоцентробежной обработки поверхностей нежестких деталей, в том числе и закаленных с твердостью материала $\leq 65 HRC$.

Авторы благодарят инженеров филиала ОАО «БЕЛАЗ» управляющей компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» Могилевский автомобильный завод им. С. М. Кирова Ю. К. Голанта, В. Н. Леушкина, стоявших у истоков создания этого научного направления.

1 Современные способы отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием

1.1 Классификация деталей по категориям жесткости

Проектированию технологического процесса механической обработки конкретной заготовки предшествует анализ исходных данных, среди которых жесткость занимает одно из первых мест. От нее во многом зависит характер построения технологических операций, выбор инструментов и оборудования, назначение режимов процесса обработки.

Жесткость, как известно, характеризуется возможностью сопротивления детали в пределах упругой деформации действию внешних нагрузок с восстановлением своей первоначальной формы после их снятия. Нагрузка, вызывающая единичную деформацию конструкции, служит качественной характеристикой ее жесткости. Расчеты жесткости деталей при различных схемах нагружения изложены в [185, 186, 188].

В. Г. Подпоркин установил, что точность обработки детали на станке зависит от того, в какой мере жесткость детали соответствует жесткости станка [186]. Например, наблюдаются парадоксальные случаи, когда при обработке жесткого вала на станке точность получается ниже, чем при обработке вала меньшей жесткости. В связи с этим был поставлен вопрос о необходимости классификации деталей по их жесткости. Это позволило бы в соответствии с требованиями равномерной податливости системы станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД) обоснованно производить выбор оборудования.

В ряде случаев жесткость деталей оценивают количественным соотношением размеров. Например, для деталей типа полых цилиндров $t_n \leq 0,05D_n$, для гладких и ступенчатых валов $l \geq 0,15D_n$, для круглых пластин $H \leq (0,2 \dots 0,3) D_n$. Здесь t_n – толщина стенки, H – высота детали, D_n – наружный диаметр [188].

Количественное соотношение размеров, служащее критерием для отнесения деталей к массивным, жестким, средней жесткости (применительно к валам), следует считать недостаточно обоснованным. Детали, характеризуемые отношением, например, длины вала к диаметру, т. е. $K_0 = l / D_n$, в указанном диапазоне значений условно относятся к нежестким. С увеличением K_0 возрастает податливость. Однако жесткость валов повышается по мере увеличения наружного диаметра.

Жесткость детали (вала) неправомерно рассматривать изолированно, вне связи с системой СПИД. В этой системе жесткий вал может оказаться слабым звеном, а нежесткий – наиболее устойчивым по сравнению с другими элементами системы.

Наименьшая неравномерность податливости системы СПИД и метод обработки могут с большей достоверностью характеризовать жесткость деталей (тел вращения). При этом податливость задней ε_3 и передней ε_n бабок, а также податливость станка ε_δ должны быть одинаковыми. Податливость системы для этих условий определяется равенством

$$\frac{K_0^3}{24D_n} = \varepsilon_\delta. \quad (1.1)$$

Минимальная податливость системы при точении вала до половины описывается уравнением

$$\frac{K_0^3}{12D_n} = 3\varepsilon_3 - \varepsilon_n. \quad (1.2)$$

С учетом изложенного в [6] предложена классификация валов по их жесткости.

Податливость жестких валов по отношению к податливости станка выражается в виде неравенства

$$\frac{K_0^3}{24D_n} < \varepsilon_\delta \quad \text{или} \quad \frac{K_0^3}{12D_n} < 3\varepsilon_3 - \varepsilon_n. \quad (1.3)$$

Критическая податливость при точении вала с одной установки меньше начальной и конечной податливостей ($\varepsilon_0 > \varepsilon_{кр} < \varepsilon_1$).

Жесткими в среднем машиностроении принято считать валы с критической податливостью системы $\varepsilon_{в.кр} \leq 0,02$ мкм/Н и жесткостью $C_{в.кр} \geq 50$ кН/мм.

Валы средней жесткости имеют податливость, соответствующую податливости станка,

$$\frac{K_0^3}{24D_n} \approx \varepsilon_\delta \quad \text{или} \quad \frac{K_0^3}{12D_n} \approx 3\varepsilon_3 - \varepsilon_n. \quad (1.4)$$

В процессе точения с одной установки по всей длине начальная и конечная податливости совпадают с критической ($\varepsilon_0 \approx \varepsilon_{кр} \approx \varepsilon_1$). Выравнивание податливости достигается при средних вылетах пиноли и центрах нормальной жесткости. Для валов средней жесткости податливость и жесткость находятся в пределах $\varepsilon_{в.кр} = 0,02 \dots 0,10$ мкм/Н и $C_{в.кр} = 10 \dots 50$ кН/мм соответственно.

У валов малой жесткости податливость превышает податливость станка, определяемую неравенством

$$\frac{K_0^3}{24D_n} > \varepsilon_\delta \quad \text{или} \quad \frac{K_0^3}{12D_n} > 3\varepsilon_3 - \varepsilon_n. \quad (1.5)$$

При обработке таких валов критическая податливость системы превосходит исходную и конечную податливости, т. е. $\varepsilon_0 < \varepsilon_{кр} > \varepsilon_1$. Постоянно имеет место погрешность обработки в виде бочкообразности. Точность обработки достигается путем повышения податливости задней бабки за счет удлиненных центров и увеличения вылета пиноли.

Для высокопроизводительной обработки валов малой жесткости необходима установка люнетов, виброгасителей и т. п., такие валы имеют податливость $\varepsilon_{в.кр} \geq 0,1$ мкм/Н и жесткость $C_{в.кр} \leq 10$ кН/мм.

С учетом возможного равенства жесткости обеих бабок станков валы можно классифицировать по среднему значению податливости бабок:

– для жестких валов

$$\frac{K_0^3}{24D_n} < \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_n}{2}; \quad (1.6)$$

– для валов средней жесткости

$$\frac{K_0^3}{24D_n} \approx \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_n}{2}; \quad (1.7)$$

– для нежестких валов

$$\frac{K_0^3}{24D_n} > \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_n}{2}. \quad (1.8)$$

Очевидно, что такая классификация деталей позволяет прогнозировать величину и характер погрешности обработки и указывает способ ее уменьшения.

Для разработки классификации нежестких деталей предлагается в качестве методологической основы принять количественную взаимосвязь жесткости и массы детали при растяжении, сжатии, изгибе и др.

Упрочняющая обработка деталей (тем более нежестких) поверхностным пластическим деформированием предполагает особые условия для разработки технологических процессов. В [186] изложена методика проектирования технологических процессов упрочняющей обработки деталей. Условная жесткость изделия в зоне обработки определяется применительно к внутренним поверхностям вращения типа гильз, труб, втулок и т. п. при помощи коэффициента

$$K_c = \frac{t_n}{\sqrt{d_n}}, \quad (1.9)$$

где t_n – толщина стенки цилиндра, мм;

d_n – внутренний диаметр поверхности раскатываемого цилиндра, мм.

По данным [208], изделия классифицируются как жесткие, средней жесткости, маложесткие и тонкостенные в зависимости от внутреннего диаметра цилиндра и коэффициента K_c (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Условная жесткость деталей типа труб и втулок

Диаметр отверстия цилиндра, мм	Коэффициент K_c для деталей			
	жестких	средней жесткости	маложестких	тонкостенных
До 25	1,5	1,00...1,50	0,50...1,00	0,50
25...50	1,55	1,05...1,55	0,55...1,05	0,55
50...75	1,60	1,10...1,60	0,60...1,10	0,60
75...100	1,65	1,15...1,65	0,65...1,15	0,65
100...125	1,70	1,20...1,70	0,70...1,20	0,70
125...150	1,75	1,25...1,75	0,75...1,25	0,75
150...175	1,80	1,30...1,80	0,80...1,30	0,80
175...200	1,85	1,35...1,85	0,85...1,35	0,85
200...225	1,90	1,40...1,90	0,90...1,40	0,90
225...250	1,95	1,45...1,95	0,95...1,45	0,95
250 и более	2,00	1,50...2,00	1,00...1,50	1,00

В [188] детали распределялись по классам в соответствии с категориями жесткости: очень жесткие (массивные), детали повышенной жесткости, средней жесткости, малой жесткости.

Существует несколько точек зрения в методике оценки жесткости деталей. Наиболее объективной следует считать такую, которая характеризует жесткость детали из условия наименьшей неравномерности податливости системы и метода обработки.

Анализ ряда работ [187, 188] позволяет разделить все детали на пять категорий жесткости (рисунок 1.1). Детали категорий IV и V называются нежесткими.

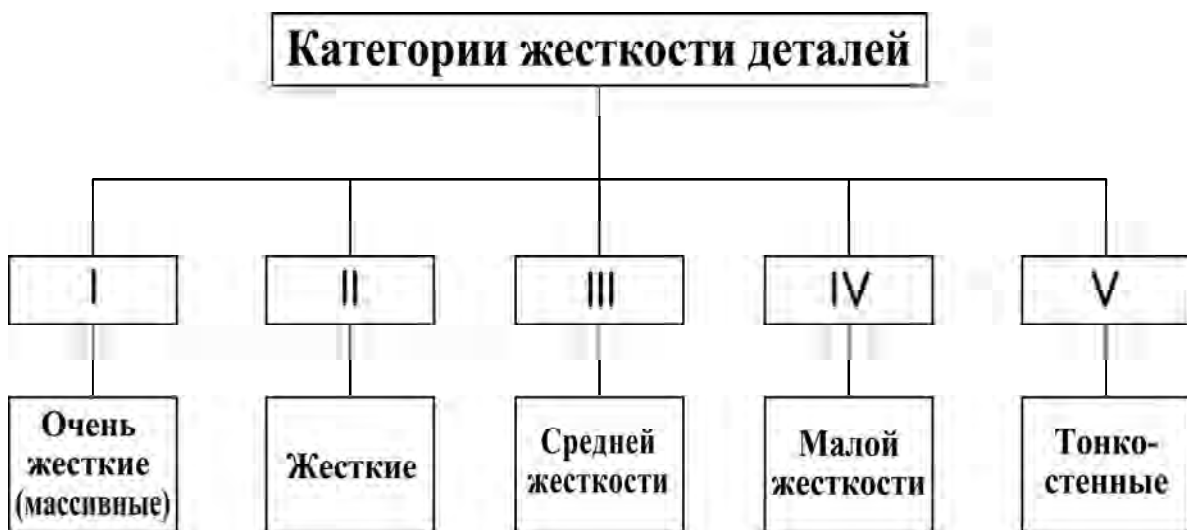


Рисунок 1.1 – Классификация деталей в соответствии с категориями жесткости

1.2 Классификация способов отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием

Существует много способов для упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Согласно классификации (рисунок 1.2), способы упрочняющей обработки целесообразно разделить на две группы.

К первой группе (**статическое ППД**) относятся способы, характеризующиеся тем, что деформирование поверхностных микронеровностей происходит при непрерывном контакте и постоянной силе воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность.

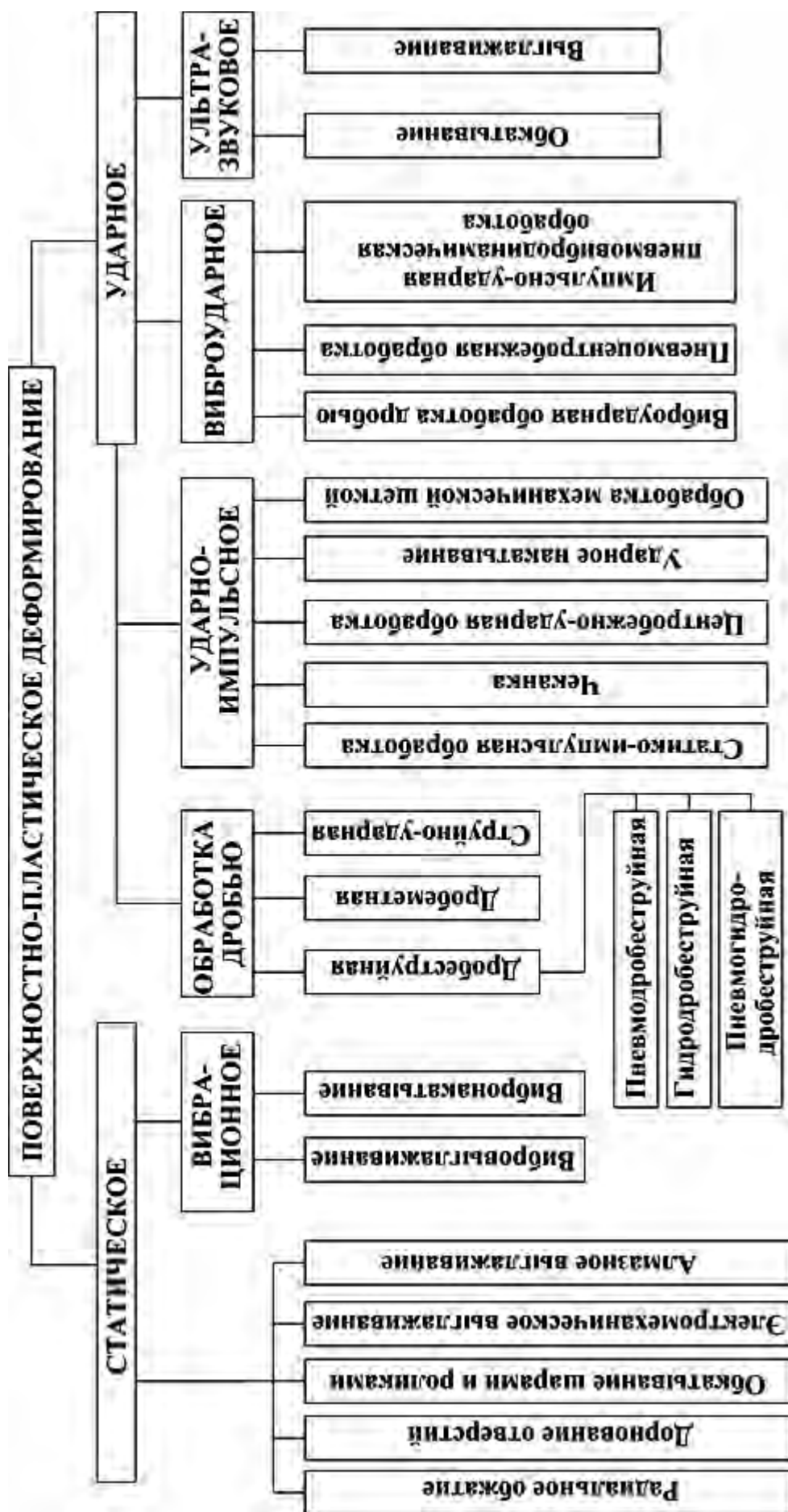


Рисунок 1.2 – Классификация способов отделочно-упрочняющей обработки поверхностей ППД

Наибольшее промышленное распространение получили дорнование поверхности отверстий шариковыми и роликовыми дорнами, радиальное обжатиe, обкатывание шарами и роликами, выглаживание алмазами и твердосплавными пластинами и др.

К отдельной подгруппе статического ППД относятся способы *вибрационного* ППД, которые характеризуются тем, что упрочняющую обработку проводят в условиях вибрационного контакта деформирующих элементов с обрабатываемой поверхностью. Новым в кинематике таких инструментов является наличие дополнительного движения деформирующего элемента, например, колебаний нормально к обрабатываемой поверхности и вдоль нее. Усложнение траектории движения деформирующих элементов во всех случаях приводит не только к интенсификации процесса обработки, но и к улучшению качественных показателей обработанной поверхности детали [35].

Ко второй группе (**ударное ППД**) относятся способы, основанные на том, что деформирование поверхностных микронеровностей осуществляется преимущественно за счет хаотичных или упорядоченных ударов, наносимых деформирующими элементами по обрабатываемой поверхности. В результате ударов на поверхности образуются локальные пластические отпечатки, которые впоследствии покрывают всю обработанную поверхность детали. При этом происходит импульсный контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Ударное ППД, в свою очередь, подразделяется на четыре подгруппы. К первой подгруппе относится *обработка дробью*, которая включает дробеструйную, дробеметную и струйно-ударную [1–3].

Дробеструйная обработка в зависимости от вида рабочей среды, подающей дробь в зону обработки, подразделяется на пневмо-, гидро- и пневмогидроструйную [1]. При дробеметной упрочняющей обработке подача дроби в зону обработки осуществляется дробеметом – ротором, который вращается со скоростью 40...100 м/с. Струйно-ударная обработка поверхности детали включает дробеструйную и абразивно-струйную обработку, которая, кроме упрочнения, повышает маслостойкость поверхностей прецизионных пар трения [2, 3].

Для второй подгруппы – *ударно-импульсной обработки* – характерна возможность воздействия на упрочняемую поверхность управляемым импульсом с получением требуемого расположения пластических отпечатков на обработанной поверхности детали. Наиболее распространенной обработкой такого типа является чеканка.

Одной из разновидностей ударно-импульсной обработки является новый вид ППД – статико-импульсная обработка (СИО). Этот процесс реализуется посредством разработанного гидравлического генератора механических импульсов [4, 5]. Предварительное статическое поджатие инструмента перед ударом позволяет наиболее полно передать энергию удара в нагружаемую среду, повышая КПД процесса до 30 % [6, 7]. СИО рекомендуется для упрочнения тяжело нагруженных деталей, имеющих глубину несущего слоя до 10 мм и более, работающих в условиях усталостного износа. СИО позволяет варьировать в широких пределах степень и глубину упрочнения. При этом может быть получен почти равномерно упрочненный слой глубиной до 10 мм со степенью упрочнения до 250...300 %.

К третьей подгруппе относится *виброударная обработка*, для которой характерно наличие ударных импульсов в сочетании с вибрациями.

Виброударная обработка дробью осуществляется в вибрирующей рабочей камере за счет соударения стальных закаленных шаров в абразивной среде и поверхностей обрабатываемых деталей.

К этой же подгруппе относятся и новые способы пневмовибродинамической обработки – пневмоцентробежная (ПЦО) и импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка (ИУ ПВДО), описанные в работе.

Отдельной подгруппой выделяют способы *ультразвукового* ППД, при котором к инструменту, наряду со статической силой прижима к обрабатываемой поверхности, сообщают ультразвуковые колебания, создаваемые специальным генератором. В результате инструмент импульсно деформирует поверхностный слой детали с большой интенсивностью колебаний, что позволяет значительно по сравнению со статическим обкатыванием увеличить кратность приложения силы при обработке.

Однако разработанная классификация способов поверхностного деформирования не отражает в полной мере многообразия процессов обработки нежестких деталей поверхностным пластическим деформированием и другими способами, которые получили широкое распространение в технологии машиностроения. Оптимальным вариантом их классификации может быть признак используемой рабочей среды в процессе обработки. На рисунке 1.3 представлена классификация способов обработки нежестких деталей, для которых характерно использование в качестве энергоносителя среды под давлением.

Сущность процесса, технологические возможности пневмодробеструйной обработки изложены в [8, 14], гидродробеструйной – в [9].

Наиболее общим признаком для пневмовибрационной струйно-абразивной [10], гидроабразивной [11] и гидрообработки является использование среды под давлением в качестве энергоносителя. Это же относится и к пневмоимпульсной, и к пневмовибродинамической обработкам [12, 13, 15].

Пневмоимпульсный способ обработки состоит в том, что во внутреннюю полость вала с обеих сторон периодически подается сжатый воздух, который приводит в возвратно-поступательное движение рабочую смесь, представляющую собой гранулы абразива или стальные шары, применяемые в зависимости от условий обработки. Для обеспечения стабильных свойств поверхностного слоя детали необходимо проводить закрутку потока воздуха вместе с рабочими телами. Процесс апробирован на пустотелых валах газотурбинных двигателей. Вначале необходимо проводить полирование, а затем упрочнение стальными шарами. Этот способ обработки позволяет заменить шлифование и полирование. Кроме того, создаются остаточные напряжения до 400 МПа, глубина залегания которых составляет 0,15...0,2 мм [13, 15].



Рисунок 1.3 – Классификация способов обработки нежестких деталей с использованием среды под давлением

Современные способы вибродинамической обработки можно классифицировать по видам обработки и применительно к конфигурации обрабатываемых поверхностей нежестких деталей (рисунок 1.4).

Все рассмотренные способы обработки допускают использование роторных машин, линий, поэтому их следует относить к технологиям высокого класса. При этом возможна обработка заготовок в процессе непрерывного транспортного движения инструмента и предмета обработки [39–41].



Рисунок 1.4 – Классификация способов вибродинамической обработки

1.3 Способ финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработки деталей

Механика процесса финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработки была реализована в определенной степени на принципе работы пневматического шарикового вибродвигателя, представляющего собой механизм с одной движущейся деталью – шаром, который под действием сжатого воздуха, поступающего через одно или несколько сопел, движется по беговой дорожке кольца, закрепленного в корпусе [16]. Если установить вибродвигатель на подвижную систему, то в зависимости от наложенных

связей она будет вибрировать в направлении оставшихся степеней свободы, лежащих в плоскости движения шара.

Необходимая частота и усилия вибраций регулируются давлением подаваемого сжатого воздуха. Так, например, при давлении сжатого воздуха 0,1...0,2 МПа и в зависимости от конструкции вибродвигателя получают частоту вращения шара 4000...8000 мин⁻¹, а при давлении 1,0...1,1 МПа частота вращения шара составляет 19000...25000 мин⁻¹.

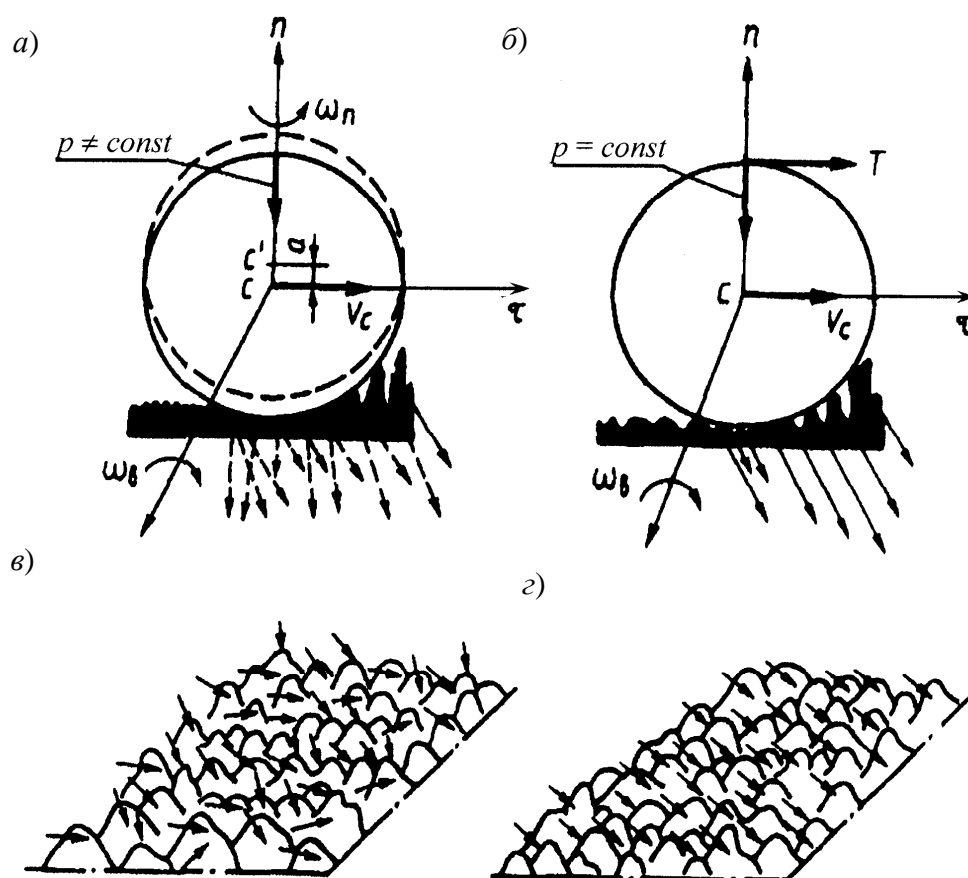
В основе способа ПВДО лежит механизм импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность рабочих тел, имеющих многоосное вращение относительно собственного центра масс и перемещающихся в турбулентном кольцевом потоке сжатого воздуха, который находится в состоянии адиабатического истечения при выходе из сопел камеры расширения инструмента. На этом принципе разработаны способы пневмоцентробежной (ПЦО) упрочняющей, суперфинишной, абразивной, импульсно-ударной (ИУО), совмещенной, комбинированной финишной обработки заготовок главным образом нежестких деталей. Способ ПЦО содержит основные вышеназванные признаки процесса ПВДО [50].

Как видно из рисунка 1.5, силовое воздействие на микрорельеф обрабатываемой поверхности при пневмоцентробежной обработке отличается от воздействия традиционной обработкой ППД – алмазным выглаживанием, раскатыванием и др. Механизм формирования микрорельефа приближается к вибронакатыванию с преобладающим направлением силы по нормали к обрабатываемой поверхности. Изменение траектории движения центров шаров по эллипсу способствует непрерывному периодическому изменению усилия, что улучшает качество формирования упрочненной поверхности. Режим сложного автоколебательного движения рабочих тел с шестью степенями свободы создает условия, при которых существенно снижается сила пластического деформирования, что согласуется с выводами, полученными профессором Ю. Г. Шнейдером [35].

Разнонаправленное силовое воздействие рабочих тел на исходный микрорельеф способствует созданию благоприятных пластических сдвигов слоев металла и его деформационному упрочнению. Поверхность меньше, чем при резании и шлифовании, разрушается, т. к. снижается уровень остаточных напряжений (в сравнении с алмазным выглаживанием, центробежно-шариковой накаткой) и уменьшается их концентрация.

На рисунке 1.6 представлена схема пневмоцентробежной обработки шарами внутренней цилиндрической поверхности. Существенное отличие от традиционных накатников заключается в том, что деформирующие элементы воздействуют на обрабатываемую поверхность в среде струй

сжатого воздуха в условиях изменения энергии поступательного и вращательного движений с угловыми скоростями, величина которых на порядок выше, чем у жестких накатников. Шары, приводимые в движение сжатым воздухом, прижимаются к внутренней поверхности обрабатываемой заготовки центробежной силой. Раскатывание происходит при проскальзывании в зонах контакта шаров с исходным микрорельефом и их вращении. При наличии осевого перемещения инструмента (подачи) траекторией центра шара является винтовая линия.



а, в – пневмоцентробежная обработка; *б, г* – обработка традиционными способами ППД

Рисунок 1.5 – Схема силового воздействия деформирующих элементов на исходный микрорельеф

Для уяснения сущности способа пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки рассмотрим конструкцию и принцип работы инструмента (рисунок 1.7). На боковой поверхности корпуса 1 инструмента перпендикулярно его оси выполнена камера расширения 2, в которой свободно размещены деформирующие шары 3.

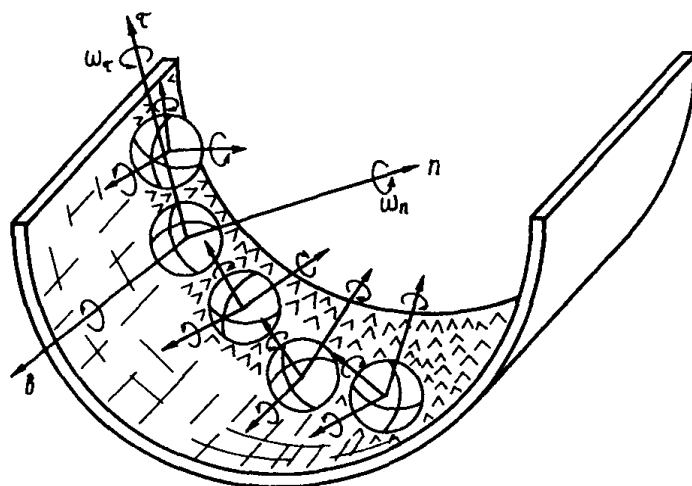


Рисунок 1.6 – Схема пневмоцентробежной обработки и основные движения деформирующих элементов

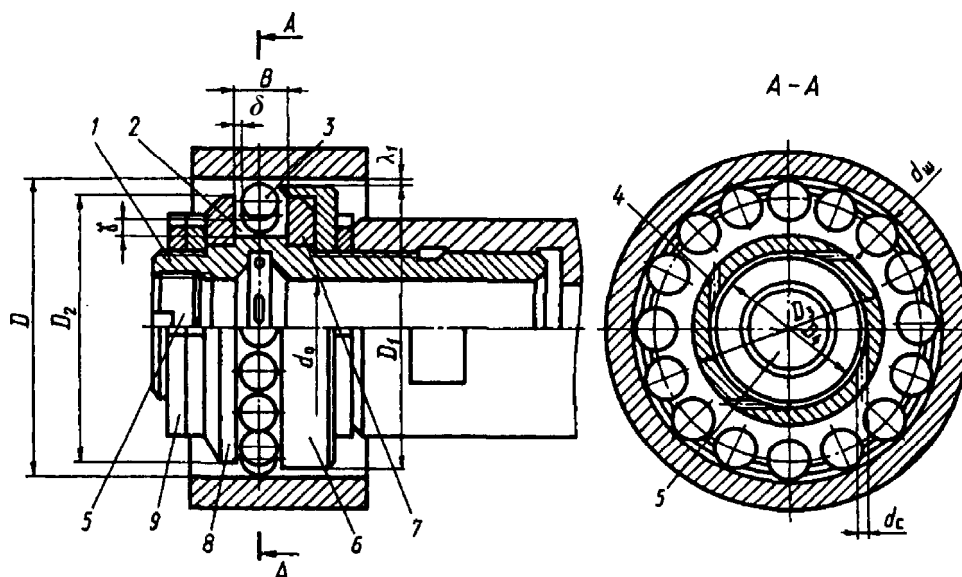


Рисунок 1.7 – Пневматический шариковый накатник центробежного действия

Сжатый воздух, попадая в камеру из сопел, расширяется, в результате происходит адиабатический процесс, связанный с поглощением тепла, возникающего в процессе обработки. В корпусе 1 находятся центральное осевое отверстие и тангенциально расположенные сопла 4, которые служат для подвода среды под давлением (сжатого воздуха) в камеру расширения 2 к деформирующим шарам 3. С торцевой стороны осевое отверстие корпуса 1 закрыто пробкой 5. Для предупреждения выпадания деформирующих шаров из камеры расширения предусмотрен кожух 6, т. е. созданы условия для быстрой и удобной замены шаров в случае их износа и обеспечивается технологичность изготовления дисков 7

и 8. Боковые поверхности камеры расширения образованы торцовыми поверхностями дисков 7 и 8, каждый из которых насажен на посадочные цилиндрические поверхности корпуса 1 и зафиксирован гайками 9 от поворота и осевого перемещения.

Корпус 1 имеет хвостовик с резьбовой и гладкой цилиндрическими частями для закрепления инструмента в оправке, посредством которой передается осевое усилие от исполнительного механизма устройства или станка для перемещения инструмента вдоль оси обрабатываемой детали. Осевое отверстие корпуса соединено с источником питания.

Процесс обработки заключается в следующем. Инструмент в исходном положении устанавливают соосно с обрабатываемой заготовкой таким образом, чтобы деформирующие шары 3 вошли с ней в контакт. Обрабатываемой заготовке сообщают вращение (возможна обработка при неподвижной заготовке), а инструменту – линейное перемещение вдоль оси этой заготовки. Одновременно подводят сжатый воздух от системы питания к центральному осевому отверстию корпуса 1 инструмента, далее к соплам 4 камеры расширения 2 и к деформирующим шарам 3.

Под действием сжатого воздуха шары перемещаются вдоль камеры расширения и получают орбитальное вращательное движение, перекачиваясь по обрабатываемой поверхности, в результате создается центробежная сила вместе с другими силами, действующими со стороны каждого шара на обрабатываемую поверхность.

Кроме вращательного, шары совершают осциллирующее и радиальное перемещения по отношению к обрабатываемой поверхности в пределах осевого δ и радиального γ зазоров шара в камере расширения инструмента. В процессе обработки направление кругового вращательного движения шаров и обрабатываемой заготовки может быть или встречным, или попутным. Возможна обработка при невращающейся заготовке, а также при попутном движении обрабатываемой поверхности и шаров.

При вращении деформирующие шары развивают основную центробежную силу пластического деформирования, в результате при сложном взаимодействии этих шаров с обрабатываемой поверхностью происходят смятие и сглаживание ее микронеровностей. По окончании процесса накатывания поверхности инструмент возвращают в исходное положение, прекратив подачу воздуха в камеру расширения.

1.4 Суперфинишная пневмоцентробежная обработка внутренних цилиндрических поверхностей

Создание способа суперфинишной ПЦО было обусловлено необходимостью повышения эксплуатационных свойств поверхностей отверстий стальных нетермообработанных заготовок, к качеству которых предъявлялись повышенные требования по ряду параметров.

Сущность способа заключается в размерной лезвийной обработке поверхности отверстия, затем в его поверхностном пластическом деформировании жесткими рабочими элементами до получения на нетермообработанной поверхности параметра шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм и последующей суперфинишной ПЦО рабочими элементами – шарами, поверхность которых имеет параметр шероховатости $Ra \leq 0,08$ мкм. Способ позволяет получать на внутренней цилиндрической поверхности стальных нежестких заготовок без термообработки шероховатость $Ra < 0,1$ мкм [197].

Например, для гильз гидроцилиндров снижение шероховатости внутренней поверхности гильзы менее 0,1 мкм по параметру Ra позволит повысить износостойкость металлополимерной пары гильза цилиндра – уплотнительное поршневое кольцо и увеличить ресурс работы гидроцилиндра [36].

Известно, что применение того или иного способа финишной обработки влияет на качество получаемой поверхности и зависит от возможностей производства. Выявленные на основании анализа [8, 18, 51, 214–219] технологические и эксплуатационные возможности финишных способов обработки поверхности отверстий сведены в таблицу 1.2.

Достижение минимальной шероховатости поверхности всегда сопряжено с увеличением трудоемкости и стоимости обработки. При достижении одинаковой шероховатости различными способами наименьшая стоимость соответствует обработке раскатыванием, наибольшая – абразивным методам обработки [217].

Достижение параметра шероховатости Ra менее 0,1 мкм возможно при накатывании поверхностей отверстий жесткими сепараторными накатниками (таблица 1.3), однако следует учитывать исходную шероховатость поверхности и жесткость заготовки.

С увеличением исходной шероховатости для получения малых значений параметра Ra необходимо увеличивать натяг, который для тонкостенной заготовки приведет к объемному деформированию ее стенок. Поэтому рекомендуют после предварительного выбора натяга по таблицам уточнить его оптимальное значение опытным путем [8].

Таблица 1.2 – Традиционные и новые способы финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей стальных заготовок

Способ обработки		Исходная шероховатость Ra , мкм	Шероховатость после обработки Ra , мкм	Глубина деформированного поверхностного слоя, мкм	Улучшенное эксплуатационное свойство	Диаметр d и длина l отверстия
Финишная обработка абразивным инструментом	Хонингование:			3...5	Маслоемкость	$d > 30$ мм, l не ограничена
	черновое	6,3...3,2	3,2...1,25			
	чистовое	3,2...1,25	1,25...0,25			
	тонкое	1,25...0,25	0,25...0,04			
	Полирование	0,32...0,08	0,16...0,02	3...5	Несущая способность	$l \leq 160$ мм
Доводочно-притирочная обработка:	грубая	1,25...0,32	0,32...0,16	3...7	Маслоемкость	$20 < d < 380$ мм, $l \leq 220$ мм
	чистовая	0,32...0,16	0,16...0,08			
	тонкая	0,16...0,08	0,04...0,01			
	Суперфиниширование:					
обычное	1,25...0,63	0,32...0,08				
тонкое	0,63...0,32	0,16...0,04				
двукратное	0,32...0,16	0,08...0,02				
Отделочно-упрочняющая обработка ПЦД	Раскатывание роликами или шариками	6,3...1,6	0,63...0,16	2000...5000	Износостойкость, герметичность	$d > 20$ мм, l не ограничена
	Безабразивная ультразвуковая финишная обработка	6,3	0,1	50...300	Износостойкость	$d = 5...10$ мм, $l = 25$ мм
						$d = 10...25$ мм, $l = 50$ мм
						$d = 25...50$ мм, $l = 250$ мм
						$d = 50...75$ мм, $l = 500$ мм
						$d > 400$ мм, $l = 6000$ мм
Упрочняющая ПЦО	0,63...0,32	0,16	20...200	Маслоемкость, износостойкость	$d > 15$ мм, l не ограничена	
Суперфинишная ПЦО	0,16...0,11	0,10...0,06	Остается от предшествующей обработки	Несущая способность, маслоемкость, износостойкость	$d > 15$ мм, l не ограничена	

Таблица 1.3 – Натяг при накатывании отверстий жесткими сепараторными накатниками [8]

В миллиметрах

Исходный параметр шероховатости Ra , мкм	Достигаемый параметр шероховатости Ra , мкм			
	0,32	0,16	0,08	0,04
1,25	0,01...0,04	0,015...0,05	0,02...0,06	0,02...0,08
2,5	0,03...0,06	0,04...0,07	0,06...0,09	0,08...0,11
5,0	0,06...0,10	0,08...0,13	0,09...0,16	0,14...0,19
10	0,12...0,17	0,14...0,19	0,17...0,22	0,19...0,24
20	0,15...0,22	0,18...0,23	0,21...0,27	–

Анализ рассмотренных способов обработки внутренних цилиндрических поверхностей стальных заготовок позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время в отечественном машиностроении суперфинишная ПЦО позволяет получать шероховатость поверхности $Ra < 0,1$ мкм, улучшать эксплуатационные свойства обработанной поверхности, не прибегая к серьезным материальным затратам.

Однако на качество поверхностного слоя оказывает влияние не только финишная операция обработки, но и весь технологический процесс. Варьируя операциями обработки, можно получить различные параметры качества поверхности и создать оптимальный поверхностный слой, обеспечивающий требуемые эксплуатационные свойства.

Например, наименьшее значение параметра шероховатости Ra получается при обработке по варианту 11 (таблица 1.4). Сведений об износостойкости поверхности отверстия, полученного по этому варианту нет, однако, согласно таблице, наименьшим износом обладают поверхности, окончательно обработанные поверхностным пластическим деформированием (накатыванием). Следовательно, износостойкость обработанных по варианту 11 поверхностей будет равна или более износостойкости поверхности после накатывания.

Применение способа обработки по варианту 11 для обработки рабочей поверхности гильз гидроцилиндров повышает износостойкость и сопротивление усталости в паре трения гильза–уплотнитель.

Суперфинишная ПЦО на окончательном этапе обработки лишь подкорректирует те положительные факторы (твердость, микроструктура, сжимающие напряжения), которые дает ППД роликами. Например, снизит параметр шероховатости, создаст благоприятную для износа форму микронеровностей.

Таблица 1.4 – Показатели качества обработки отверстий при различных сочетаниях технологических операций

Номер операции и показатель качества	Последовательность выполняемых операций и значение показателя качества при варианте										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Шлифование	Черновое растачивание	Черновое растачивание
2	Чистовое шлифование	Чистовое шлифование	Чистовое шлифование	Хонингование	Хонингование	Хонингование	Хонингование	Хонингование	Хонингование	Получитовое растачивание	Получитовое растачивание
3	Хонингование	Хонингование	Хонингование	Чистовое хонингование	Притирка	Притирка	Чистовое хонингование	Чистовое хонингование	Чистовая притирка	Чистовое растачивание	Чистовое растачивание
4	Притирка	Чистовое хонингование	Притирка	Чистовая притирка	Чистовая притирка	Накатывание	Чистовая притирка	Накатывание	Накатывание	Накатывание	Накатывание
5	Накатывание	Чистовая притирка	Чистовая притирка	Накатывание	Накатывание	–	–	–	–	Упрочняющая ПЦО	Суперфинишная ПЦО
Шероховатость Ra , мкм	0,21	0,24	0,17	0,17	0,19	0,22	0,23	0,27	0,21	0,16	0,1...0,06
Износ, мкм	6	8	7	4	2	7	10	6	5	–	–

Принцип действия и механика процесса суперфинишной ПЦО аналогичны уже описанным в подразделе 1.3 для пневмоцентробежной обработки.

При суперфинишной ПЦО характерно разнонаправленное, строго дозированное, в определенных пределах, силовое вибрационное воздействие шаров с низкой шероховатостью на гребешки микрорельефа, что способствует снижению шероховатости обрабатываемой поверхности.

Смятие и сглаживание микровыступов происходят в различных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров при постоянном изменении направления вращения.

В результате ударов шаров о поверхность происходит местный разогрев микровыступов (потерянная при ударе кинетическая энергия шара переходит в тепловую), поверхностный слой приобретает состояние повышенной пластичности и начинается выглаживание микрорельефа за счет растекания самого металла в микрообъеме [197].

В начале соприкосновения микрорельефа шаров с микровыступами обрабатываемой поверхности на них создаются высокие поверхностные давления, и по мере их увеличения происходит течение металла по линиям скольжения. Микрообъемы металла под действием этих сил перемещаются в направлениях свободных поверхностей впадин неровностей, заполняя их [219].

Поскольку твердость материала шаров (сталь ШХ15) намного больше твердости материала обрабатываемой заготовки, шары оставляют на поверхности следы в виде отдельных лунок, расположенных хаотично, а на дне самих лунок обеспечивается микрогеометрия в соответствии с поверхностью самих шаров [9]. Если шероховатость шаров, используемых при суперфинишной ПЦО, $Ra \leq 0,1$ мкм, то полученная после обработки поверхность имеет $Ra < 0,1$ мкм.

Сжатый воздух, используемый для вращения шаров, регулирует тепловой режим в зоне обработки, не позволяя нагреваться детали. При этом он оказывает влияние и на сам процесс суперфинишной ПЦО, т. к. содержит влагу, продукты механического износа трущихся частей и деструкции компрессорного масла, пыль, грязь и прочие загрязнители, образующие абразивную эмульсию, которая может растворять тончайшие окисные пленки на поверхности металла и таким образом способствовать интенсификации процесса выглаживания микронеровностей в ходе обработки. В силу особенностей кинематики движения рабочих тел, присутствия среды сжатого воздуха, а также низкой шероховатости рабочих элементов в процессе суперфинишной ПЦО значительно снижается сила, необходимая для осуществления процесса обработки.

1.5 Способ упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки деталей

Анализ разработанной классификации основанных на использовании среды под давлением способов обработки нежестких деталей позволяет сделать вывод о том, что значительный удельный вес в технологии машиностроения занимают процессы импульсно-ударной обработки [14, 17–24].

Являясь в большинстве случаев упрочняюще-отделочными (финишными) операциями, эти способы во многом определяют уровень эксплуатационных показателей машин и агрегатов в целом, что относится и к рассматриваемому процессу импульсно-ударной обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

На рисунке 1.8 представлен импульсно-ударный шариковый накатник для обработки внутренних поверхностей вращения, состоящий из корпуса 1, на котором диски 2 и 3 образуют камеру расширения *B*, имеющую форму кольцевой канавки, где свободно размещены приводящие шары 4 (для упрощения: приводящие шары – шары, шары-бойки – бойки). На диске 3 расположен стакан 5, имеющий возможность осевого перемещения по внешней резьбовой поверхности диска 3. Обращенные друг к другу торцы диска 2 и стакана 5 образуют кольцевую канавку *B*, в которой свободно размещены бойки 6. В заданном положении стакан 5 фиксируется посредством винта 7, упирающегося в резьбу диска 3. Ширина камеры расширения *B* регулируется осевым перемещением диска 3 относительно корпуса 1, после чего диск фиксируется на корпусе гайкой 8. Корпус снабжен резьбовым хвостовиком для закрепления инструмента на оправке 9. Для подвода сжатого воздуха в корпусе 1 выполнено осевое отверстие *Г*, закрытое с торца пробкой 10. Камера расширения *B* соединена с осевым отверстием *Г* корпуса 1 тангенциальными каналами-соплами *Д*, с атмосферой – отверстиями *Е*.

При работе импульсно-ударного инструмента оправка 9 закрепляется, например, в задней бабке токарного станка, обрабатываемая деталь – в его патроне. Обрабатываемой детали сообщают вращение, в осевую полость *Г* корпуса 1 подают сжатый воздух. Поступая через тангенциальные каналы-сопла *Д* в камеру расширения *B*, он приводит шары 4 в круговое движение по призматическим направляющим камеры расширения *B*. При круговом перемещении шары осуществляют периодическое ударное воздействие на бойки 6, размещенные во внешней кольцевой канавке *B*.

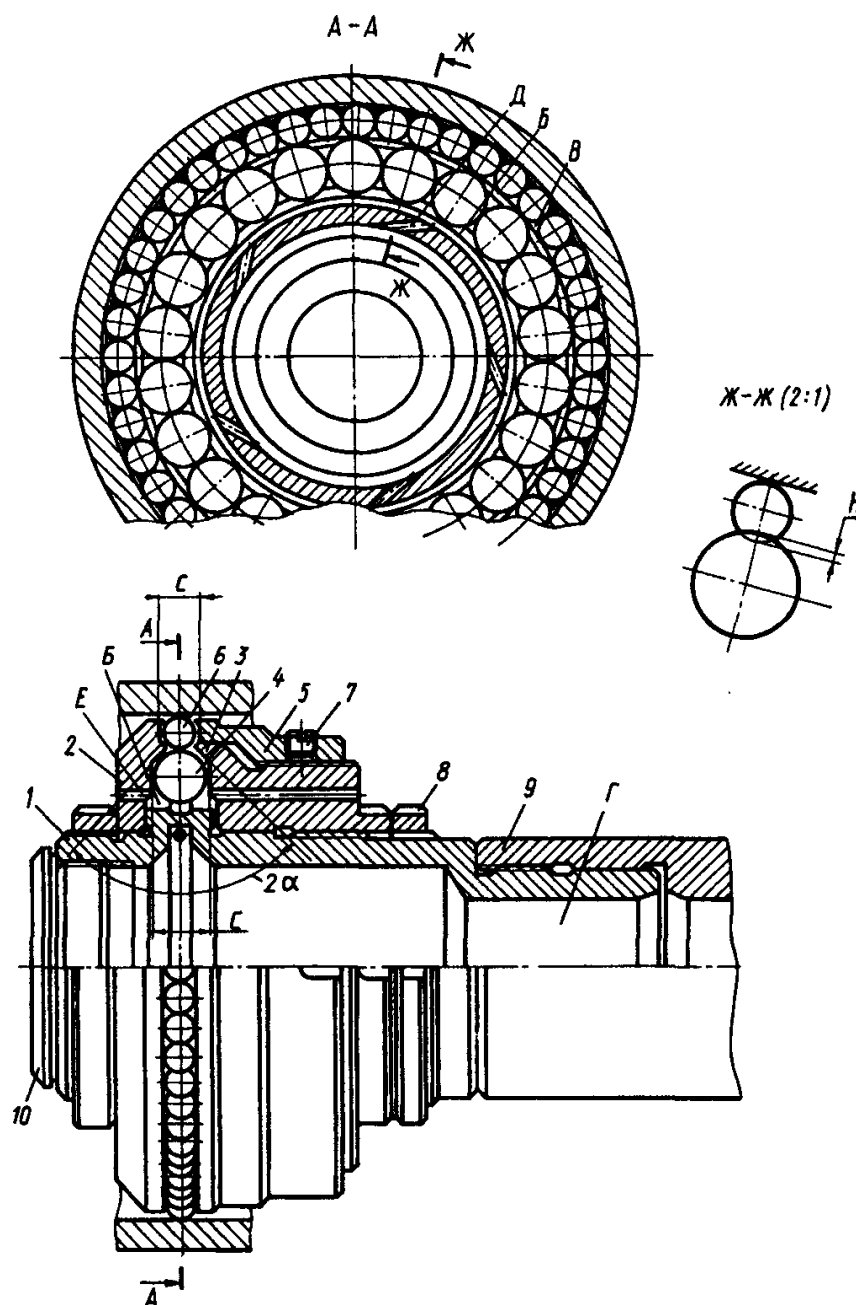


Рисунок 1.8 – Конструктивная схема шарикового накатника импульсно-ударного действия

Бойки, в свою очередь, наносят удары по обрабатываемой поверхности, в результате на ней образуется своеобразный микрорельеф в виде сетки лунок. Под воздействием шаров 4 и отработанного воздуха бойки 6 получают круговое перемещение относительно оси инструмента, но со значительно меньшей скоростью, чем приводящие шары. Благодаря круговому перемещению бойков возможна обработка импульсно-ударным инструментом невращающихся, например корпусных, деталей. При

обработке импульсно-ударным инструментом сжатый воздух, наряду с функцией привода шаров, выполняет функцию охлаждающей среды.

1.6 Способ получения регулируемого микрорельефа

Существуют такие способы образования на поверхностях пар трения различных каналов [26] и канавок [35], которые способствуют, например, в гильзах двигателей, устранению задиров, натиров, схватывания и увеличению износостойкости в 1,4...1,7 раза [31–34].

За рубежом распространены хромированные по накатанной поверхности с образованием лунок алюминиевые цилиндры бензиновых двигателей воздушного и водяного охлаждения и дизелей с диаметром цилиндров до 125 мм. Причинами повышения антифрикционных свойств поверхности после накатки являются лунки, заполненные смазочным материалом, предотвращающие образование горячих зон в отдельных пятнах контакта, устраняющие возможность заедания или делающие его локальным; поверхность трения, удерживающая значительно больше смазочного материала с более равномерным его распределением по поверхности; углубления, облегчающие удаление продуктов износа с поверхностей трения. Отмечено, что свойства накатанной поверхности зависят от глубины и шага накатки при заданной форме углублений.

Например, для хромированной поверхности зеркала цилиндра авиационного двигателя оптимальными считают шаг накатки 2 мм, размер углублений в плане 0,6×0,6 мм (углубления имеют вид пирамиды с углом при вершине 90°). Такая накатка обеспечивает минимальный износ цилиндра и поршневых колец. Смазочного материала расходуется не больше, чем при ненакатанном цилиндре [36]. Следует отметить, что технология получения углублений является достаточно трудоемкой.

Более совершенная технология характерна для способа, сущность которого состоит в том, что деформирующие шары размещают на обрабатываемой поверхности с заданными шагами в продольном и поперечном направлениях, шарам большего диаметра или ударникам сообщают осевое перемещение относительно деформирующих с подачей $S_{ш.уд} = 0,05...5$ м/мин при давлении сжатого воздуха P , подводимого к шарам большего диаметра, 0,05...1 МПа (рисунок 1.9). Ударники в процессе обработки получают вращательное с частотой $n_{ш.уд}$ и колебательное с частотой $n_{дв.х}$ движения.

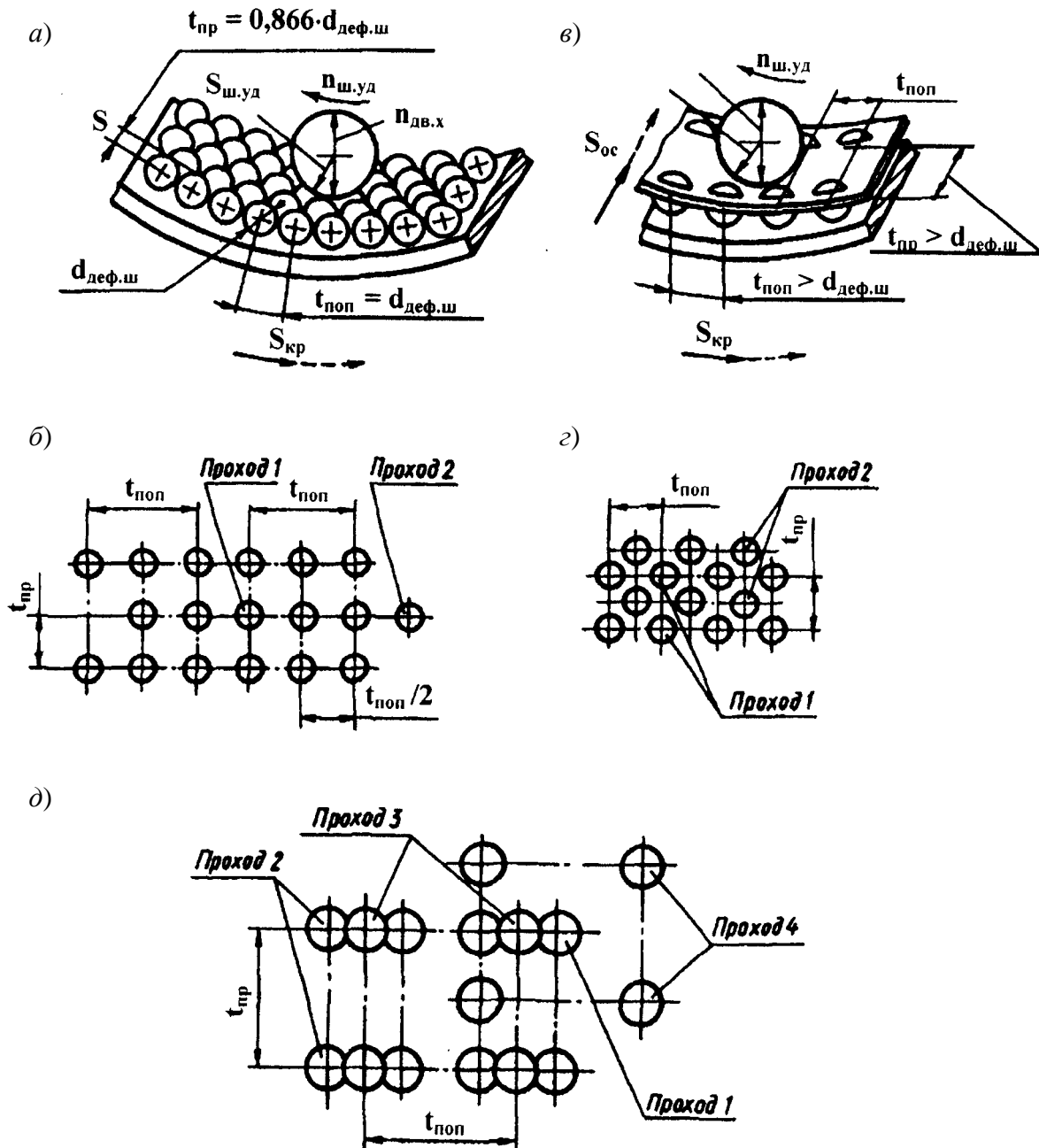


Рисунок 1.9 – Способ получения регулируемого микрорельефа

При однопроходной обработке на рабочей поверхности детали образуется поверхность с лунками – отпечатками расположения деформирующих шаров (см. рисунок 1.9, б).

При угловом дискретном перемещении заготовки $S_{кр}$ относительно деформирующих шаров на величину $t_{поп}/2$ образуются отпечатки шаров – лунки от второго прохода.

Для получения регулируемого рельефа поверхности в продольном и поперечном направлениях с различной или одинаковой величиной шага предложена следующая схема обработки (см. рисунок 1.9, *в*). Деформирующие шары заключены в сепаратор, а шары-ударники, как и в схеме на рисунке 1.9, *б*, имеют возможность кругового вращательного с частотой $n_{ш.уд}$ и колебательного с частотой $n_{дв.х}$ движений. Кроме того, заготовка или сепаратор с деформирующими шарами имеет возможность независимого дискретного $S_{кр}$ и $S_{ос}$ перемещения при заданном, согласно схеме, расположении шаров $t_{поп}$ и $t_{пр}$. На рисунке 1.9, *г* показана схема расположения лунок на обрабатываемой поверхности, а на рисунке 1.9, *д* – одна из схем расположения лунок при многопроходной обработке, заданная чертежом рабочей поверхности детали.

На рисунке 1.10 представлены конструктивные схемы инструментов для обработки в соответствии с описанными кинематическими схемами. Обработку осуществляют при осевом перемещении шаров-ударников с оправкой относительно деформирующих шаров. При этом шары-ударники вращаются под действием струй сжатого воздуха.

Таким образом, имеются предпосылки для развития и интенсификации технологий машиностроительного производства нежестких деталей на базе способов обработки с получением на рабочих поверхностях как нерегулярных, так и регулярных микрорельефов, а также для создания высоких эксплуатационных свойств деталей [37].

1.7 Способ комбинированной обработки внутренних поверхностей вращения

Сущность способа обработки состоит в следующем. Деталь 1, внутренняя поверхность которой подвергнута ПВДО с сохранением требуемых геометрических параметров по чертежу, закрепляют в приспособлении (рисунок 1.11), сообщают ей вращение с угловой скоростью ω_d и наносят абразивный материал (пасту 2) на обрабатываемую поверхность по диаметру D_d . Далее устанавливают в исходном положении инструмент 3 с шарами 4, на поверхности которых нанесен абразивный материал – паста 2. К шарам подводят среду под давлением P , например, сжатый воздух, и сообщают возвратно-поступательное перемещение инструменту 3 с расположенными в нем шарами 4 с подачей S . Направление вращения шаров $\omega_{ш}$ и детали ω_d встречное. Кроме того, каждый из шаров совершает вращательное движение вокруг собственного центра масс $\omega_{ш}$ и колебательные в двух плоскостях.

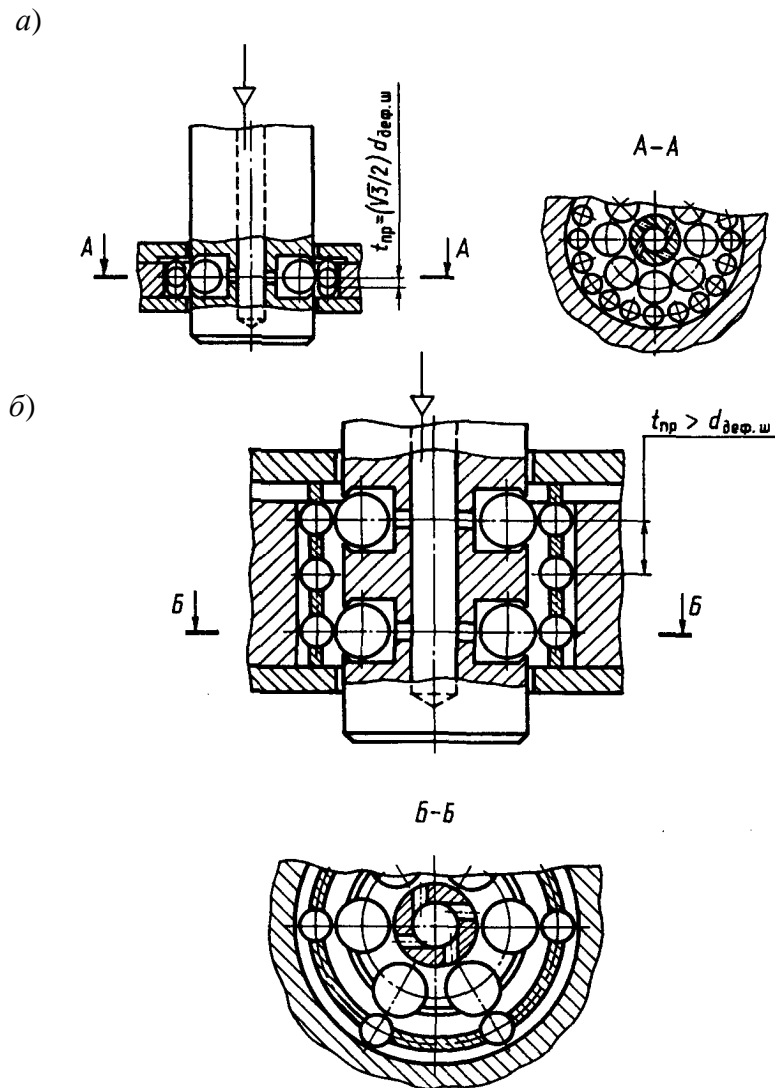


Рисунок 1.10 – Инструменты для получения регулируемого микрорельефа

На рисунке 1.11 указано направление колебаний каждого шара по нормали к обрабатываемой поверхности и осциллирующее движение б вдоль поверхности обработки. Амплитуда его значительно меньше, чем колебание по нормали к обрабатываемой поверхности.

Взаимодействие шара с обрабатываемой поверхностью в процессе комбинированной окончательной обработки определяется силой, соизмеримой с силой, создаваемой, как и в процессе поверхностного пластического деформирования, т. е.

$$\sum F_0 \leq \sum F_{\text{max ппд}}, \quad (1.10)$$

где $\sum F_0$ – суммарная сила шаров, действующая на зерна абразивного материала и обрабатываемую поверхность (при окончательной обработке), Н;

$\sum F_{\text{max пнд}}$ – максимальная суммарная сила шаров, действующая на обрабатываемую поверхность при поверхностном пластическом деформировании (до окончательной обработки), Н.

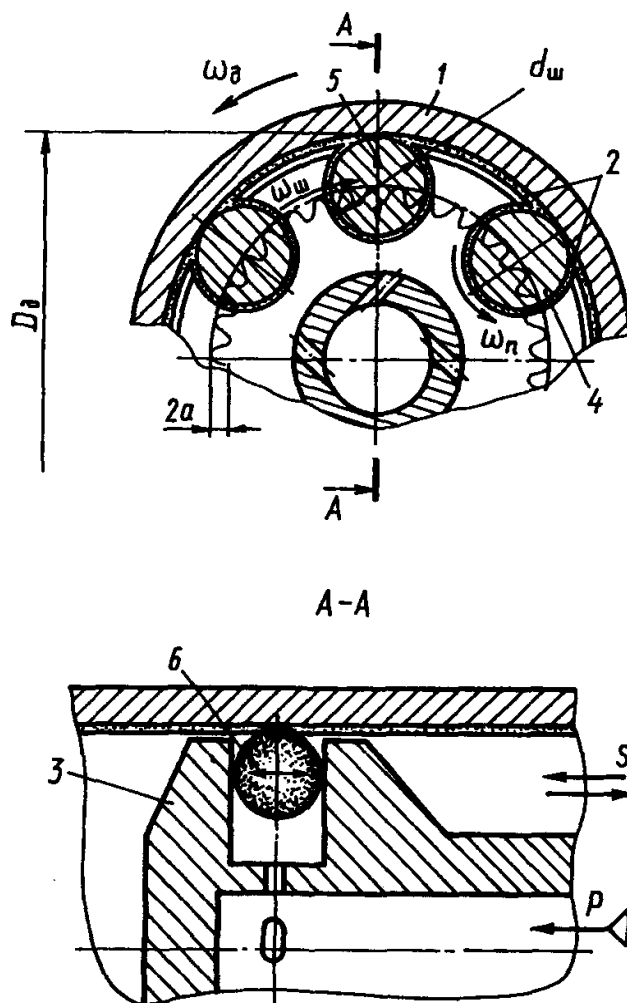


Рисунок 1.11 – Способ комбинированной обработки

Максимальная суммарная сила $\sum F_{\text{max пнд}}$ не должна превышать допустимую силу $P_{\text{доп}}$, определяющую податливость системы СПИД

$$\varepsilon = \frac{y}{P_{\text{доп}}}, \quad (1.11)$$

где y – максимальная поперечная деформация заготовки, полученная при $P_{\text{доп}}$ в зависимости от условий обработки.

Превышение y приведет к тому, что обрабатываемая деталь получит остаточную деформацию с отклонением ее значения от геометрических размеров, оговоренных чертежом, поэтому следует соблюдать условие

$$\sum F_0 \leq \sum P_{\text{доп}}. \quad (1.12)$$

В процессе взаимодействия шаров и абразивного материала с обрабатываемой поверхностью происходит их совместное на нее воздействие, в результате чего осуществляется микрорезание, размельчение тончайшего поверхностного слоя, химическое воздействие поверхностно-активных веществ (ПАВ), пластическое течение микрорельефа полируемой поверхности.

Для интенсификации процесса обработки (рисунок 1.12) деформирующее и абразивное воздействия на обрабатываемую поверхность чередуют через раз, применяя абразивные шары 1 с меньшей твердостью, чем твердость абразивного обрабатываемого материала, и шаров 2 с большей твердостью, чем твердость обрабатываемого материала.

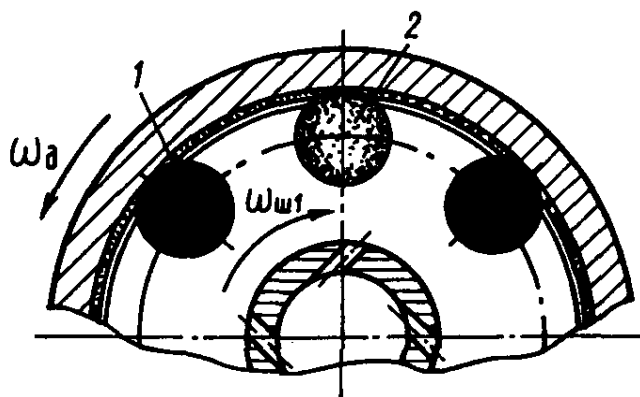


Рисунок 1.12 – Схема инструмента для интенсификации процесса обработки

Для создания участков шероховатости поверхности со значениями Ra , различающимися в зависимости от эксплуатационных свойств, предъявляемых к поверхности детали, обработку осуществляют, изменяя давление и расход среды под давлением при постоянной подаче инструмента, используя оптимальный закон [38].

Комбинированная обработка заготовок из конструкционных сталей с твердостью материала $HRC_3 \leq 50$ обеспечивает получение шероховатости Ra до 0,03 мкм. Возможна также финишная обработка заготовок из сталей с твердостью материала 60...63 HRC_3 .

2 Механика процессов пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения

2.1 Формирование микрорельефа и топографии поверхности

Использование сжатого воздуха для привода вращения деформирующих шаров, обеспечивающих получение микрорельефа и топографии обработанной поверхности, обусловлено кинематикой их движения, определяемой законами аэродинамики и механики.

Согласно [42, 43], воздух имеет малую вязкость и его движение в расширительной камере инструмента является вихреобразным. Деформирующий шар, проходя во время вращательного движения над струей сжатого воздуха, выходящего из сопла, испытывает усилие, стремящееся затормозить его движение, а затем оторвать от обрабатываемой поверхности. Частицы сжатого воздуха при турбулентном движении описывают сложные траектории, а местная скорость не сохраняется постоянной даже в том случае, когда расход потока постоянен во времени. Установившегося движения в турбулентном потоке нет. В каждой точке скорость непрерывно изменяется по величине и направлению. В точке турбулентного потока ее считают мгновенной местной скоростью [44].

Изменение во времени проекции мгновенной местной скорости в каком-либо направлении вызывает пульсацию скорости и, соответственно, вибрацию деформирующих шаров, но со значительно меньшей амплитудой.

Сложное движение шаров, находящихся под действием турбулентного потока, односторонняя нежесткая связь их с обрабатываемой поверхностью, неустойчивое положение при контактировании с различными выступами микронеровностей, развиваемая при этом каждым шаром центробежная сила создают благоприятные условия для возрастания деформирующего действия этих шаров и упрочнения поверхностного слоя [17].

Регулированием расхода воздуха за счет изменения размеров камеры расширения инструмента, ее основных параметров, расположения сопел, их конфигурации, размеров и количества обеспечивается режим автоколебаний шаров в направлении нормали к траектории центра. Такое усложнение кинематики деформирующих элементов обеспечивает протекание процесса упрочнения в условиях ударно-динамического разнонаправленного воздействия на исходный микрорельеф.

Смятие и сглаживание микровыступов обрабатываемой поверхности происходят в разных направлениях в результате изменения кинетической энергии деформирующих элементов при постоянном изменении направления вращения.

Локальное кратковременное воздействие на микронеровности в различных направлениях, согласно дислокационной теории, способствует увеличению количества плоскостей скольжения в блоках в различных направлениях и уменьшению сопротивления развитию очагов деформации. Значительно снижается сила, необходимая для осуществления процесса поверхностного деформирования материалов. Обильный приток сжатого воздуха обеспечивает интенсивное удаление продуктов износа из зоны обработки, что особенно заметно при использовании хрупких материалов.

Следовательно, на процесс формирования микрорельефа и топографии поверхности существенное влияние оказывают процессы, происходящие в камере расширения инструмента (аэродинамика).

Микрорельеф и топография поверхности после пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки, полученные на растровом электронном микроскопе, представлены в [17]. После раскатывания поверхность не идеально гладкая, а с микролунками, не имеющими строгой направленности, что обусловлено разнонаправленным деформированием поверхностного слоя заготовки.

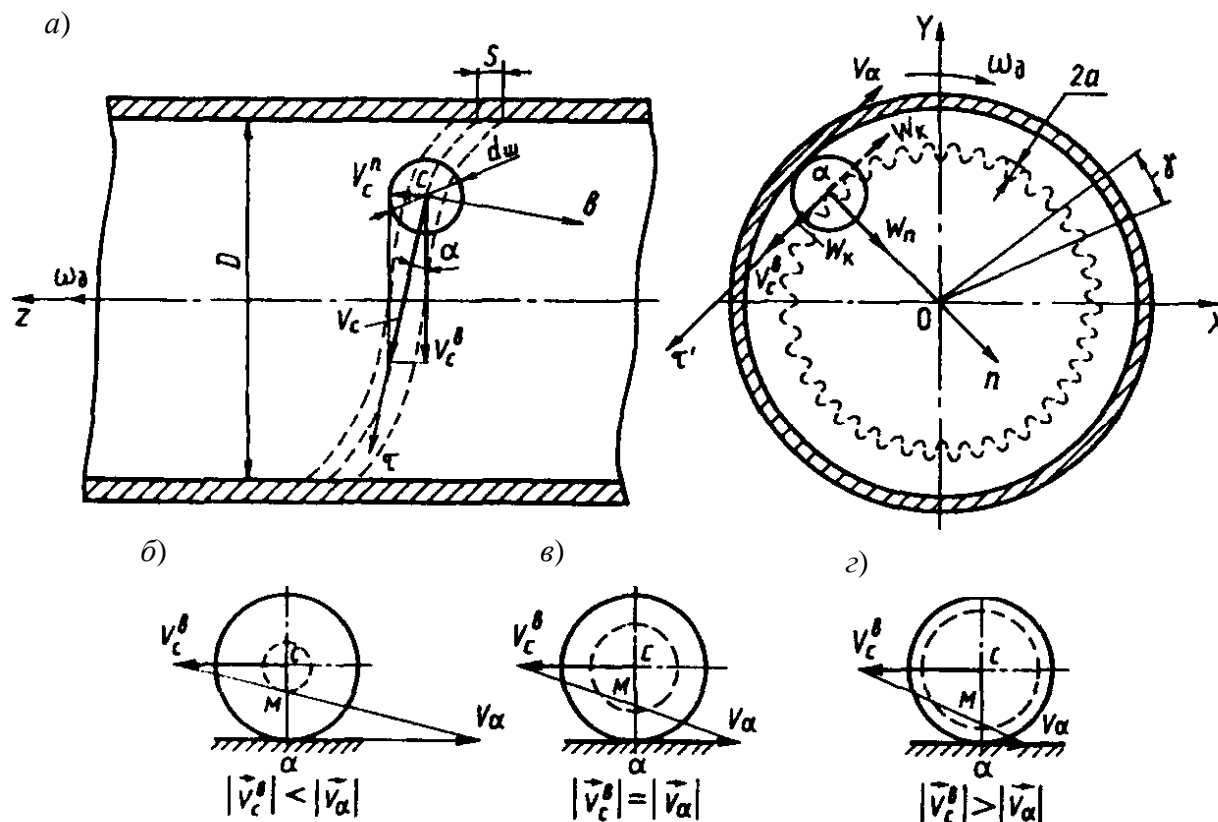
Конструктивные параметры инструмента влияют на формирование топографии поверхности и определяют особенности кинематики движения деформирующих шаров [45].

2.2 Кинематика и динамика процесса пневмоцентробежной обработки

При воздействии среды под давлением (сжатого воздуха) деформирующие элементы (шары) перекатываются по обрабатываемой поверхности, вращающейся в направлении, противоположном воздушному потоку. При этом инструмент имеет осевое перемещение (см. рисунок 1.7). В результате получается сложное движение деформирующих элементов [17].

Оси естественного трехгранника \vec{r} , \vec{n} , \vec{b} подвижной системы координат проходят через центр шара, который движется по винтовой линии, имеющей параметр кинематического винта (параметр винтового движения).

Кинематика движения шара в инструменте (рисунок 2.1) с уравнениями движения относительно неподвижной системы координат X, Y, Z подробно рассмотрены в [14, 222].



ω_0 – угловая скорость радиус-вектора OC , c^{-1} ; ω_d – угловая скорость детали, c^{-1} ; S – перемещение инструмента в осевом направлении; n, τ, b – нормаль, касательная и бинормаль к траектории центра шара (единичные векторы осей естественного трехгранника); a_1 – амплитуда колебательного движения шара вдоль оси; XOY – оси координат, связанные с вращающейся деталью; $d_{ш}$ – диаметр шаров; φ – угол поворота радиус-вектора OC относительно осей XOY при равномерном вращении, $\varphi = (\omega_0 + \omega_d)t$; v_c^b – скорость центра шаров при их вращении в воздушном потоке и контактировании с деталью

Рисунок 2.1 – Кинематика деформирующих элементов в процессе пневмоцентробежной упрочняющей обработки

Шары в процессе орбитального вращения в камере расширения инструмента перемещаются так, что их центры, участвуя в колебательном движении вдоль оси Z , движутся по винтовой линии. Амплитуда колебательного движения a_1 зависит от размеров шаров, их массы, геометрических параметров камеры инструмента, исходного микро-рельефа, упругих свойств обрабатываемой поверхности и находится в пределах осевого δ и радиального γ зазоров в камере расширения. При

этом $\delta \ll \gamma$. Круговая частота колебаний шара $k \gg \omega_{0c}$.

Соударение шаров с микрорельефом обрабатываемой поверхности происходит при качении с проскальзыванием и верчением, что обеспечивает интенсивное сглаживание микровыступов с поверхностным упрочнением.

В процессе обработки шары прижимаются к поверхности детали центробежной силой инерции

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \frac{D - d_{ш}}{2}, \quad (2.1)$$

где m – масса шара, кг;

ω – угловая скорость шаров, c^{-1} ;

D – диаметр отверстия детали, м;

$d_{ш}$ – диаметр шара, м.

Переменная сила, действующая на шар вдоль оси \vec{n} в результате его колебательного движения,

$$F = -m \cdot a_1 \cdot k^2 \cdot \sin kt, \quad (2.2)$$

где a_1 – амплитуда колебательного движения шара, м;

k – круговая частота колебаний шара, Гц;

t – время, с.

Максимальная сила, действующая на обрабатываемую поверхность, при каждом соударении шара

$$F_{\max} = m \left(\omega^2 \cdot \frac{D - d_{ш}}{2} + a_1 \cdot k^2 \right). \quad (2.3)$$

Таким образом, воздействие сил на исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности в разных направлениях и сложная кинематика движения шаров способствуют интенсификации процесса обработки и уменьшают на порядок силу, необходимую для осуществления процесса поверхностного пластического деформирования [48].

Динамика процесса пневмоцентробежной обработки подробно изложена в [222]. Необходимость определения усилий, действующих в процессе раскатывания, связана с проектированием оборудования, устройств, приспособлений и разработкой технологического процесса. Процесс раскатывания сопровождается сложным объемным деформи-

рованием, происходящим с одновременным воздействием в зоне контакта деформирующего шара и обрабатываемой детали пластических и упругих деформаций, явлением упрочнения поверхностного слоя и другими факторами.

Анализ дифференциальных уравнений [222] показывает, что суммарное силовое воздействие со стороны деформирующих элементов на обрабатываемую поверхность можно представить как результат действия нормальной силы \vec{N}_a , касательной F_a и крутящего момента M_a , возникающего при верчении шара.

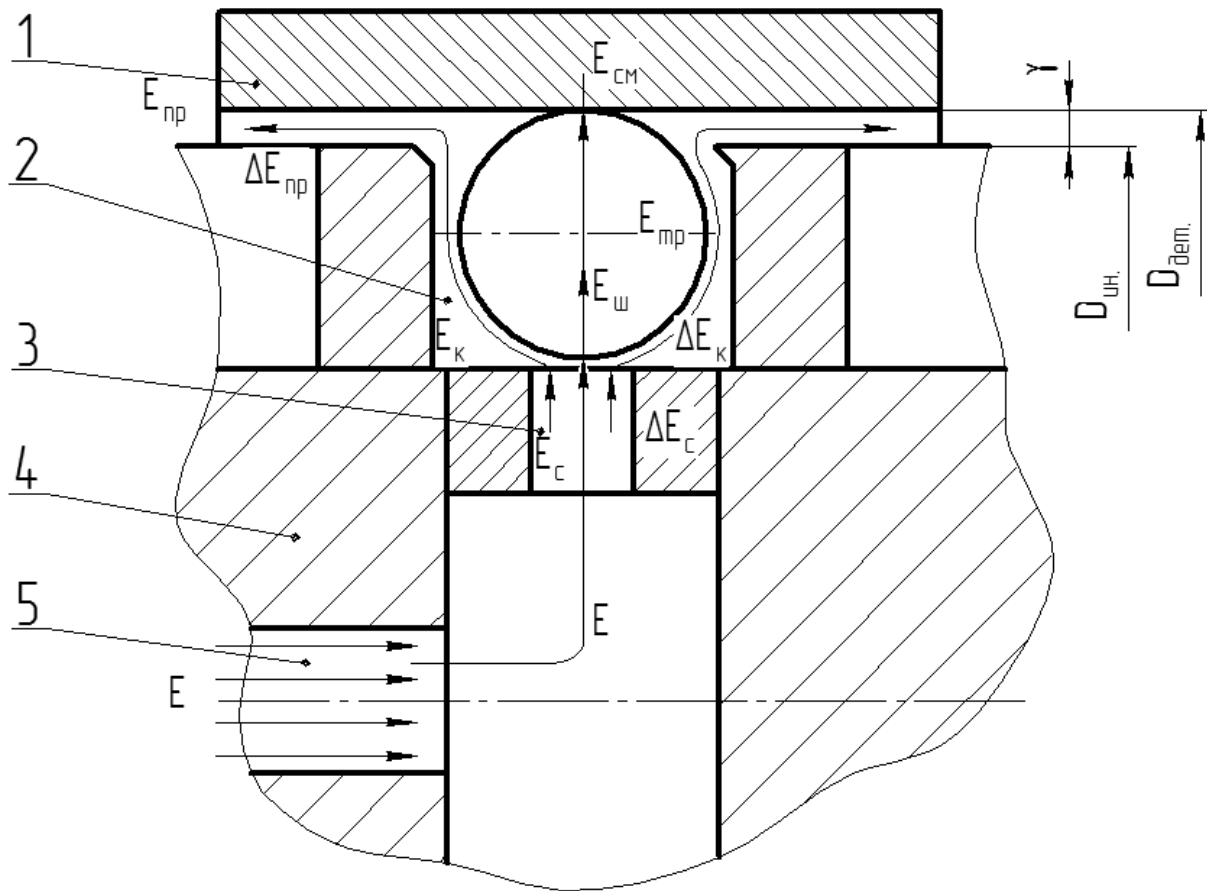
Согласно многократным экспериментальным исследованиям, износ деформирующих шаров в процессе обработки происходит в результате их чистого трения скольжения по одному из торцов диска инструмента. Шары вырабатывают на диске радиусную круговую канавку. Причиной этого является ориентированное положение в пространстве центра масс шара (гироскопический эффект) при его орбитальном вращении относительно оси инструмента. В установившемся движении положение центра масс не изменяется. В результате через точку контакта сферической поверхности индентора с торцевой поверхностью диска инструмента (в подвижной системе координат) проходит главная ось инерции. Шар вращается вокруг собственного центра масс. Скорость точки контакта шара с поверхностью диска при его вращении относительно главной оси инерции почти равна нулю. По существу, преобладает одноосное вращение вокруг бинормали.

2.3 Энергетический анализ работы пневмоцентробежного накатника

В основе конструирования и совершенствования пневмоцентробежного накатника лежат его энергетические характеристики. Сравнительный анализ этих характеристик позволяет оценивать возможности инструмента, экономичность, а в отдельных случаях – совершенствовать его.

При анализе работы данного инструмента не рассматривается влияние характеристик подводящих (питающих) трубопроводов. Параметры подводящей системы постоянны и известны, давление воздуха в осевой полости инструмента контролируется манометром, поэтому ее влияние в данном случае носит второстепенный характер.

Рассмотрим кинематику потока сжатого воздуха в пневмоцентробежном накатнике [75], схема которого представлена на рисунке 2.2.



1 – заготовка; 2 – камера расширения; 3 – сопло; 4 – корпус инструмента; 5 – осевой канал корпуса инструмента

Рисунок 2.2 – Кинематика потока сжатого воздуха в пневмоцентробежном накатнике

Единица массы поступающего воздуха обладает некоторым запасом потенциальной энергии E . В инструменте потенциальная энергия давления сжатого воздуха преобразовывается в кинетическую энергию струи сопла. Суммарную кинетическую энергию сопел обозначим как E_c . При этом некоторая часть полного запаса энергии в результате этого преобразования будет безвозвратно потеряна (ΔE_c). В свою очередь, часть кинетической энергии $E_{ш}$ струй сопел передается шарам, которые совершают обработку детали, другая часть снова преобразуется в потенциальную энергию давления рабочей камеры E_k , при этом определенная часть ΔE_k теряется на эти преобразования. Потенциальная энергия давления воздуха в рабочей камере E_k тратится на перемещение воздуха $E_{пр}$ из рабочей камеры в атмосферу через кольцевой зазор между обрабатываемой деталью и инструментом и потери $\Delta E_{пр}$ на преобразование потенциальной энергии

давления воздуха в камере E_k в кинетическую энергию потока воздуха, выходящего через кольцевой зазор в атмосферу [75].

Описанный энергетический процесс можно представить в виде уравнения сохранения энергии

$$E = E_c + \Delta E_c, \quad (2.4)$$

где E – подведенная потенциальная энергия сжатого воздуха, Дж;

E_c – кинетическая энергия струй, Дж;

ΔE_c – потери энергии на преобразование потенциальной энергии давления сжатого воздуха в кинетическую энергию струй, Дж.

В свою очередь, кинетическую энергию струй можно рассмотреть как

$$E_c = E_{ш} + E_k + \Delta E_k, \quad (2.5)$$

где $E_{ш}$ – кинетическая энергия шаров (основная часть ее уходит на обработку заготовки), Дж;

E_k – потенциальная энергия сжатого воздуха в камере, Дж;

ΔE_k – потери энергии в рабочей камере на преобразование кинетической энергии струй в потенциальную энергию воздуха в камере, Дж.

Потенциальная энергия в камере

$$E_k = E_{пр} + \Delta E_{пр}, \quad (2.6)$$

где $E_{пр}$ – энергия, которая тратится на перемещение воздуха через кольцевой зазор в атмосферу, Дж;

$\Delta E_{пр}$ – потери энергии на преобразование потенциальной энергии камеры в кинетическую энергию потока сжатого воздуха, выходящего через кольцевой зазор в атмосферу, Дж.

Тогда суммарная потенциальная энергия поступающего воздуха (баланс энергий) будет определяться по формуле

$$E = E_{ш} + E_{пр} + \Delta E_{пр} + \Delta E_k + \Delta E_c. \quad (2.7)$$

В свою очередь, часть кинетической энергии шара $E_{ш}$ уходит на трение и другие потери в камере расширения $E_{тр}$, а ее основная часть – на смятие неровностей поверхности $E_{см}$:

$$E_{ш} = E_{тр} + E_{см}. \quad (2.8)$$

Графически схема преобразования энергии представлена на рисунке 2.3.

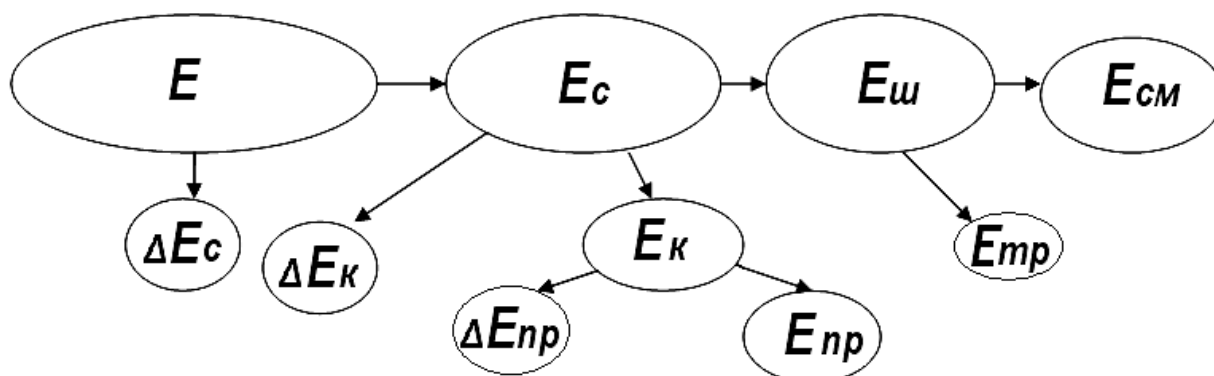


Рисунок 2.3 – Схема преобразования энергии давления сжатого воздуха в инструменте

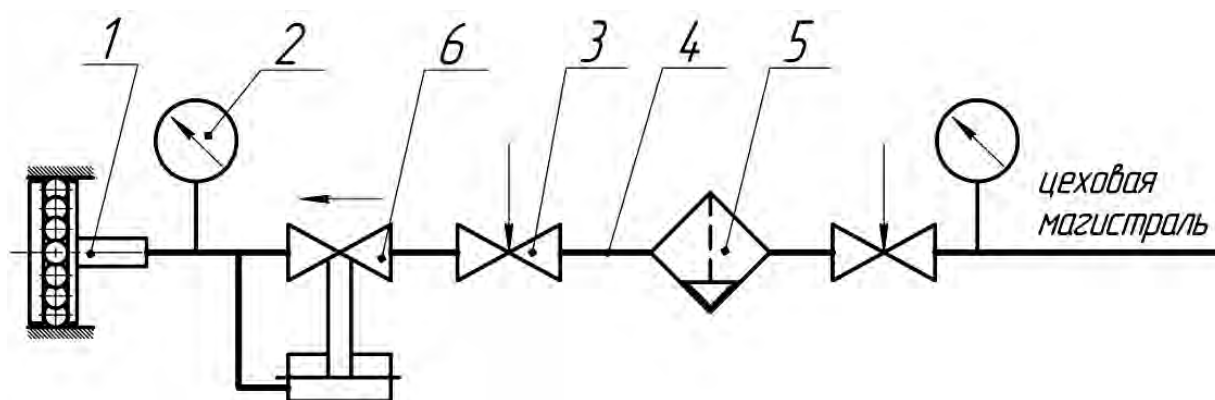
Если рассмотреть процесс преобразования энергии в единицу времени, то получим баланс мощностей.

Задача сводится к получению максимального значения кинетической энергии шара $E_{ш}$ и наиболее эффективному воздействию его на обрабатываемую заготовку.

2.4 Основы проектирования технологического оснащения при разработке технологии пневмоцентробежной обработки

Для реализации процесса пневмоцентробежной обработки необходим подвод сжатого воздуха к инструменту посредством пневмосистемы, рекомендуемая общая схема которой приведена на рисунке 2.4.

При проектировании пневмосистемы и инструментов для ПВДО решаются задачи выбора основных элементов пневмосистемы и параметров инструмента: диаметра трубопровода подводящей системы и осевого канала инструмента, диаметра и количества сопел, диаметра и количества деформирующих элементов, зазоров (осевого, радиального и для выхода отработавшей среды в атмосферу). Взаимосвязь параметров в процессе пневмоцентробежной обработки представлена на рисунке 2.5.



1 – инструмент для ПВДО; 2 – манометр; 3 – кран; 4 – трубопровод; 5 – маслолагоотделитель; 6 – регулятор давления

Рисунок 2.4 – Принципиальная схема пневмосистемы

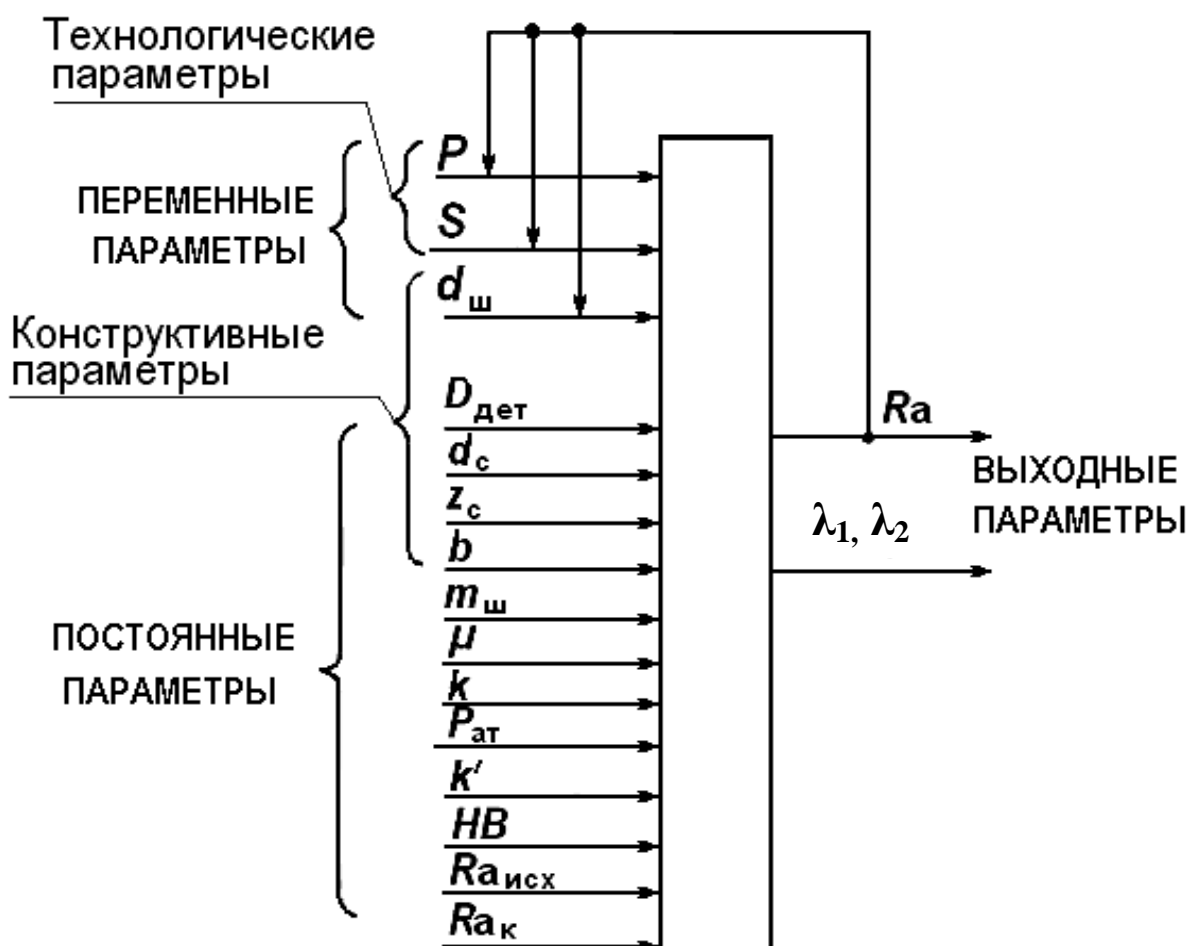


Рисунок 2.5 – Структурная схема взаимодействия параметров при пневмоцентробежной обработке

Следовательно, основными параметрами при проектировании инструмента для пневмоцентробежной обработки являются [75]:

- диаметр заготовки $D_{\text{дет}}$, м;
- диаметр шаров $d_{\text{ш}}$, м;
- давление в осевой полости инструмента P , МПа;
- диаметр сопел $d_{\text{с}}$, м;
- коэффициент расхода воздуха через сопло $\mu_{\text{с}}$;
- число сопел $z_{\text{с}}$;
- показатель адиабаты k ;
- давление атмосферное $P_{\text{ат}}$, МПа;
- коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, k' ;
- исходная шероховатость поверхности (до обработки) $Ra_{\text{исх}}$, мкм;
- конечная шероховатость поверхности (требуемая) $Ra_{\text{к}}$, мкм;
- твердость обрабатываемого материала HB ;
- коэффициент Пуассона μ ;
- масса шара $m_{\text{ш}}$, кг;
- коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом μ_3 ;
- частота вращения детали $n_{\text{дет}}$, мин^{-1} ;
- осевая подача инструмента $S_{\text{о}}$, мм/об;
- подача $S_{\text{мин}}$, мм/мин;
- расстояние, определяющее расположение сопел относительно оси b , м;
- зазоры между деталью и инструментом λ_1 и λ_2 , м.

При проектировании пневмосистемы и выборе ее элементов следует учитывать расстояние, на котором находится источник питания от инструмента. Сжатый воздух, подаваемый по относительно длинному трубопроводу, теряет часть энергии на местные сопротивления, т. е. происходит существенный перепад давления, величина которого зависит как от длины трубопровода пневмосистемы, состояния трубы и ее абсолютной шероховатости, так и от диаметра трубопровода $d_{\text{тр}}$ и местных сопротивлений.

Инструмент является конечным звеном в общей цепи пневмосистемы. Упрощенная схема пневматического шарикового накатника центробежного действия (рисунок 2.6) включает наружный диаметр инструмента $D_{\text{и}}$, диаметр шара $d_{\text{ш}}$, зазоры λ_1 и λ_2 для выхода отработавшей

среды в атмосферу, осевой δ и радиальный γ зазоры шара в камере расширения с расположенными в ней деформирующими шарами, диаметр d_c и число сопел z_c , длину сопел l_c , внутренний диаметр осевого канала инструмента $d_{и}$, соединяемый с трубопроводом.

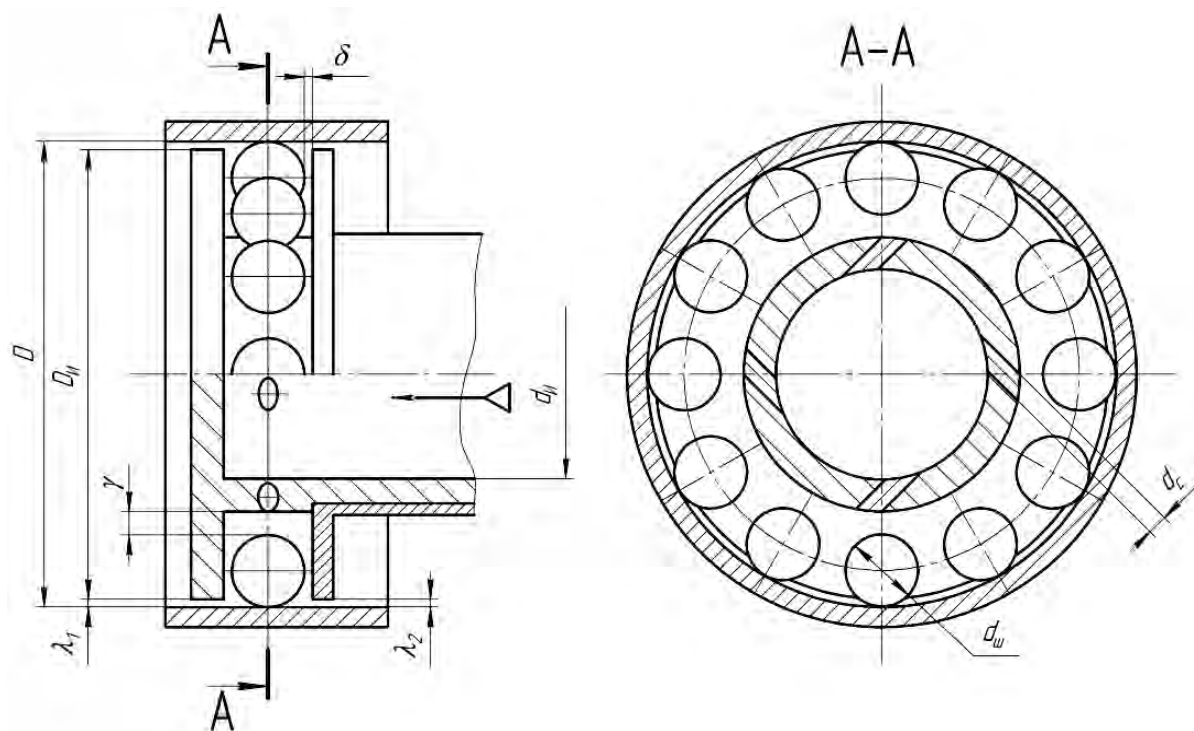


Рисунок 2.6 – Упрощенная схема накатника

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что стабильность технологического процесса и его качество гарантируются при выполнении следующих условий.

1 Давление сжатого воздуха и его расход в единицу времени для конкретных условий обработки следует поддерживать и контролировать пускорегулирующей аппаратурой (в подводящей системе необходимо устанавливать регуляторы давления, манометры).

2 В системе питания сжатым воздухом (в подводящей системе) необходимо предусматривать масловлагодотделитель.

3 Диаметр осевого канала инструмента $d_{и}$ определяют расчетным путем.

4 Диаметр деформирующих шаров выбирают в зависимости от степени жесткости заготовки. Предпочтительно принимать $d_{ш} \leq 5$ мм, что позволит существенно уменьшить уровень звукового давления, обеспечив точность обработки по Нб.

5 Диаметр сопел принимают равным 1,0...3,0 мм, их количество определяют расчетным путем.

6 Осевой и радиальный зазоры деформирующих шаров в камере расширения – $\delta = 0,03...0,8$ мм, $\gamma = 2...12$ мм соответственно; значения 0,03...0,05 и 2...12 мм принимают при обработке нетермообработанных материалов; минимальный зазор следует контролировать для поддержания стабильности процесса.

7 Для нормальной работы инструмента необходимо обеспечить соответствующее сопротивление выходу отработавшей среды согласно разработанной методике; в противном случае резко снижается эффект деформирования микронеровностей исходной поверхности.

8 Материал дисков должен иметь малый коэффициент трения ($f_0 = 0,08...0,005$) и среднюю твердость; можно применять композиты и полимеры, а если диски выполнены из стали ШХ15 твердостью 42...46 HRC, желательнее предусмотреть периодическую смазку беговой дорожки диска, по которой скользят шары.

9 Исходной шероховатостью под ПВДО для различных конструкционных, инструментальных сталей и чугунов является высота микронеровностей $Ra \leq 2...1,25$ мкм (предпочтительны чистовое или тонкое растачивание, шлифование чистовое и тонкое, хонингование).

10 Для термически обработанных сталей и чугунов с $HRC > 40$ исходная шероховатость под ПВДО должна быть $Ra \leq 0,6...0,32$ мкм (предпочтительны растачивание резцами из эльбора-Р, гексанида и тонкое шлифование, хонингование).

11 При упрочняющей обработке деталей, имеющих глубокие внутренние поверхности вращения, не должно быть значительных биений поверхности, т. к. при этом снижается эффект упрочняющей обработки; предпочтительно раскатывание поверхности таких деталей при неподвижной заготовке и осевом перемещении инструмента.

Определяющим для выполнения последующих расчетов является внутренний диаметр заготовки D , от которого зависит внутренний диаметр $d_{тр}$ подводящей системы трубопровода. На рисунке 2.7 представлена эквивалентная схема инструмента, где $F_{и}$ – площадь проходного сечения трубопровода, m^2 ; F_c – суммарная площадь проходного сечения сопел инструмента, m^2 ; F_3 – площадь проходного сечения для выхода отработавшей среды в атмосферу, m^2 ; $P_{и}$ – давление сжатого воздуха в трубопроводе при входе в осевую полость инструмента, Па; P_c – давление сжатого воздуха в соплах, Па; P_3 – давление сжатого воздуха в кольцевом зазоре между наружным диаметром инструмента и внутренним диаметром

заготовки, Па; $P_{к.р.}$ – давление сжатого воздуха в камере расширения инструмента, Па; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па.

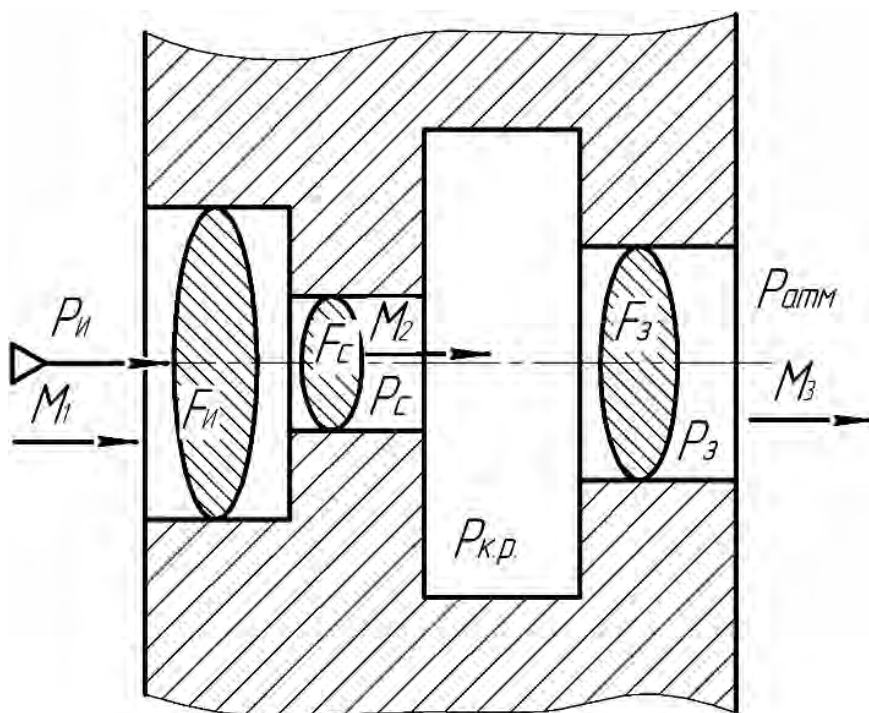


Рисунок 2.7 – Эквивалентная схема пневмосистемы с инструментом

В соответствии с уравнением неразрывности потока сжатого воздуха массовый расход M воздуха, проходящего по трубопроводу с проходным сечением $F_{и}$, по соплам с суммарным проходным сечением $F_{с}$ и на выходе с проходным сечением $F_{з}$, будет постоянным, т. е.

$$M_1 = M_2 = M_3 = \text{const.} \quad (2.9)$$

Массовый расход определяется отношением массы воздуха, протекающего через выходное сечение сопла в единицу времени, из выражения

$$M = V \cdot \rho_c = F_c \cdot v_{в.п.} \cdot \rho_c, \quad (2.10)$$

где V – объемный расход, м³/с;

ρ_c – плотность воздуха в выходном сечении сопла, кг/м³;

$v_{в.п.}$ – скорость истечения воздуха из сопла, м/с.

Скорость истечения воздуха из сопла определяется из уравнения [190]

$$v_{в.п.} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_{и} \cdot v_{и} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2.11)$$

где k – показатель адиабаты, зависящий от природы рабочей среды, для воздуха $k = 1,4$;

$v_{и}$ – удельный объем газа в трубопроводе, м³;

R – газовая постоянная, для воздуха $R = 287,3$ Дж/(кг·К);

T_1 – температура торможения потока, К.

После преобразования выражение (2.11) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} M &= F_c \sqrt{\left(\frac{2k}{k-1} \right) \cdot \frac{P_{и}}{v_{и}} \cdot \left[\left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \\ &= F_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \rho_1 \cdot P_{и} \cdot \left[\left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{к.р.}}{P_{и}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где ρ_1 – плотность воздуха в сечении на входе в осевую полость инструмента из трубопровода, кг/м³.

Массовый расход воздуха, проходящего через сопла с площадью сечения на выходе F_c , при неизменных начальных параметрах $P_{и}$, $v_{и}$ зависит только от степени расширения газа β . Для проектирования инструмента важно знать оптимальное значение степени расширения воздуха, при котором наблюдаются наилучшие результаты обработки, а также обеспечить полный переход энергии давления в кинетическую энергию струи.

Чтобы определить, когда массовый расход воздуха достигает максимума, следует взять производную от M и, приравняв ее к нулю, найти отношение β , при котором $M = M_{\max}$ [191].

$$\beta = \frac{P_{к.р.}}{P_{и}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.13)$$

Из выражения видно, что отношение давлений, при котором $M = M_{\max}$, зависит только от k , т. е. от рода протекающей через сопла рабочей среды. При известном для воздуха $k = 1,4$ $\beta = 0,528$.

Анализ уравнения массового расхода (2.12) позволяет построить график зависимости массового расхода M от степени расширения газа β (рисунок 2.8).

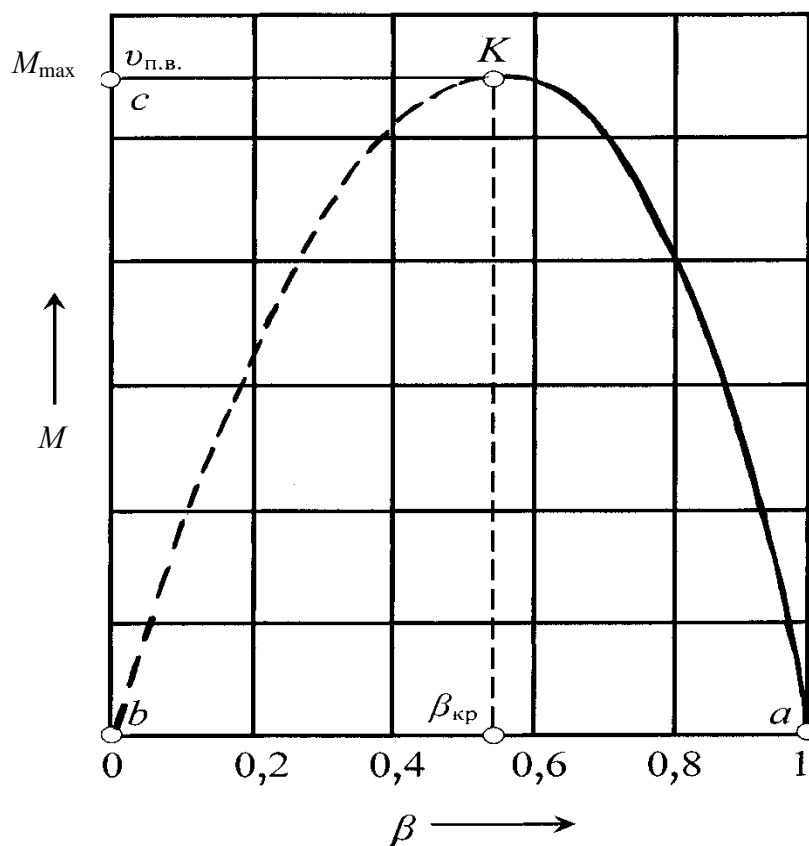


Рисунок 2.8 – График зависимости массового расхода от перепада давлений

На графике в двух точках массовый расход M равен нулю (при истечении в вакуум (точка b), когда $P_{к.р.} = 0$, и при равенстве давлений на входе $P_{и}$ и выходе из сопла $P_{к.р.}$ (точка a на графике)), т. е. истечение воздуха не происходит. При изменении отношения давлений β от 1 до 0 расход воздуха в соответствии с формулой (2.12) должен сначала увеличиваться до критического значения $\beta_{кр} = 0,528$ (точка K), а затем уменьшаться до 0 (точка b).

Экспериментальным путем было установлено [190, 192, 193], что кривая $a-K$ соответствует теоретически построенному графику зави-

симости, а кривая $K-b$ полностью расходится с опытом, т. е. при дальнейшем уменьшении отношения β (β становится менее $\beta_{кр}$) массовый расход остается постоянным (отрезок $K-c$). Давление $P_{к.р.}$ на выходе из сопла, при котором массовый расход становится максимальным, соответствует критическому давлению p_k .

Критическое давление – это наименьшее давление, которое может установиться в выходном сечении сужающихся или цилиндрических сопел (рисунок 2.9). Ниже p_k давление $P_{к.р.}$ на выходе из сопла не падает при любом понижении давления среды $p_{ср}$, куда происходит истечение газа из сопел.



Рисунок 2.9 – Сужающееся коническое и цилиндрическое сопла

При прохождении воздуха через сужающиеся или цилиндрические сопла инструмента может быть два варианта истечения.

1 Если давление среды, куда происходит истечение, больше критического ($p_{ср} > p_k$), то давление воздуха в выходном сечении сопел равно давлению среды ($P_{к.р.} = p_{ср}$), а такой режим истечения называется *докритическим* (см. рисунок 2.8, кривая $a-K$).

2 Если давление среды, куда происходит истечение, меньше или равно критическому ($p_{ср} \leq p_k$), то давление воздуха в выходном сечении сопел равно критическому ($P_{к.р.} = p_k$), а такой режим истечения называется *критическим* (см. рисунок 2.8, отрезок $K-c$). Этому режиму соответствуют наибольший массовый расход M_{max} , максимальная скорость истечения v_k , называемая критической, и минимальное давление на выходе из сопла p_k .

Для нахождения массового расхода и скорости истечения воздуха из сопел при докритическом режиме истечения справедливы формулы (2.11) и (2.12). При критическом режиме формулы приобретают вид:

$$v_k = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot P_{\text{и}} \cdot v_{\text{и}}}; \quad (2.14)$$

$$M_{\text{max}} = F_c \sqrt{\frac{P_{\text{и}}}{v_{\text{и}}} \cdot k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (2.15)$$

Сужающиеся и цилиндрические сопла могут быть использованы только для ускорения потока до критической скорости, т. е. получить сверхкритический режим истечения, применяя в инструменте такие виды сопел, невозможно. При этом полезной является только часть перепада давлений ($1 > \beta > 0,528$), при $\beta < 0,528$ не происходит полного перехода энергии давления воздуха в кинетическую энергию струи, часть потенциальной энергии безвозвратно теряется на образование завихрений.

Для полного использования перепада давлений и достижения на выходе из сопла сверхзвуковой скорости истечения необходимо осуществить внешнее воздействие на газовое течение. Это можно сделать геометрическим способом, расширив или сузив канал, подводом или отводом массы газа, сообщением газу механической энергии или отводом тепла. Все эти способы реализованы в различных видах сверхзвуковых сопел (геометрическое, расходное, механическое и тепловое) [194]. Также возможны комбинированные схемы сверхзвуковых сопел.

При проектировании инструмента с соплами Лаваля большое значение имеют их размеры. Длина сужающейся части сопла Лаваля выбирается минимальной для уменьшения потерь на трение, а расширяющейся определяется допустимым углом раскрытия, равным $10...12^\circ$ [43].

Конструкция цилиндрических сопел (дозвуковых) при проектировании инструмента является самой технологичной из-за малой трудоемкости изготовления. Использование конических сопел с углом конуса $7...13^\circ$ [43] позволяет улучшить технологию ПВДО, т. к. конические сопла имеют больший коэффициент скорости струи и расхода воздуха, чем цилиндрические. При этом при проектировании сопел надо учитывать их длину, которая должна находиться в пределах $l_c = (2...3)d_c$ [43], и диаметр сопел $d_c \ll d_{\text{ш}}$. С увеличением длины сопла возникают потери напора струи на трение.

Также при проектировании инструмента необходимо предусмотреть и то, что в реальных условиях течения воздуха в соплах имеет

место потеря кинетической энергии из-за трения частиц газа о стенки сопла и из-за вихревых процессов. Поэтому действительная скорость истечения воздуха через сопла $v_{п.в.д}$, действительный массовый $M_д$ и объемный $V_д$ расходы будут меньше теоретических, рассчитанных по формулам (2.10)...(2.12). Для нахождения действительных величин этих параметров следует воспользоваться коэффициентами, определяемыми экспериментально и зависящими от формы сопла [43]:

$$v_{п.в.д} = v_{п.в.} \cdot \varphi; \quad V_д = V \cdot \mu; \quad M_д = M \cdot \mu, \quad (2.16)$$

где φ – коэффициент скорости;

μ – коэффициент расхода.

Ранее при проектировании инструментов для ПВДО для определения основных аэродинамических характеристик и конструктивных параметров применялась методика [14, 195], в основе которой было заложено выполнение условия полного использования располагаемой мощности потока воздуха и задано конкретное значение давления воздуха на входе и в рабочей камере инструмента. В этой методике число сопел, диаметр сопел и наименьший диаметр трубопровода выбирались конструктивно. Спроектированные инструменты были работоспособными, однако для их наладки требовался конструкторский опыт и проведение поисковых исследований.

Известны также дополнения к рассматриваемой методике [63, 196]. Согласно [63, 196], давление в рабочей камере инструмента принималось равным атмосферному или рассчитывалось в соответствии с $P_{к.р.} \approx (1,1...1,2) \cdot P_{атм}$. Согласно уравнению неразрывности воздушного потока, давление воздуха в рабочей камере инструмента зависит от подводящего давления, числа сопел, диаметра сопел и от зазора для выхода отработавшей среды в атмосферу. Соответственно, некорректно при различных сочетаниях этих факторов принимать давления воздуха в рабочей камере инструмента $P_{и} \approx (1,1...1,2) \cdot P_{атм}$.

С целью определения зависимости давления в камере расширения инструмента от давления в подводящей системе на входе в инструмент были проведены экспериментальные исследования, которые затем сопоставлялись с теоретическими [197].

Анализ теоретических и экспериментальных зависимостей для инструментов с различными зазорами λ для выхода отработавшей среды в атмосферу показал, что расхождение экспериментальных результатов с

теоретическими составляет менее 10,5 %. На основании экспериментальных и теоретических данных были построены зависимости $P_{к.р.} = f(P_{и})$ для различных зазоров λ . Нелинейный характер зависимостей позволяет утверждать, что предложенные ранее методики определения параметров инструмента и пневмосистемы, за основу в которых взято использование при расчетах давления в камере расширения, не являются приемлемыми, а также очень трудоемки.

Экспериментально определено, что зазор для выхода отработавшего воздуха λ оказывает значительное влияние на перепад давлений в инструменте. Установлено, что величина зазора для выхода воздуха из инструмента в атмосферу $\lambda_1 \approx 0,15 \dots 0,75$ мм является предпочтительной и зависит от диаметра обрабатываемой поверхности заготовки. Тогда наружный диаметр инструмента

$$D_{и} = D - 2\lambda_1. \quad (2.17)$$

Площадь F_3 , мм², проходного сечения для выхода отработавшей среды в атмосферу определяется как

$$F_3 = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{и}^2). \quad (2.18)$$

Следует стремиться к максимально возможной центробежной силе при оптимальном отношении $F_c / F_{и}$ при деформационном упрочнении поверхности заготовки шарами [197].

Для определения внутреннего диаметра трубопровода $d_{тр}$, имеющего площадь $F_{и}$, воспользуемся выражением, согласно которому существует оптимальное проходное сечение сопел, обеспечивающее с данным трубопроводом максимальную мощность [61]:

$$F_{кр.сопел} = F_{и} \cdot q(\lambda_1). \quad (2.19)$$

При проектировании трубопровода на максимально достигаемую мощность коэффициент сохранения полного давления $\sigma_{0-1} \approx 0,63$. При этом отношение площади сопел к площади проходного сечения трубопровода [61]

$$F_c = (0,3 \dots 0,5) F_{и}. \quad (2.20)$$

Для определения диаметра сопел и их количества необходимо, зная диаметр инструмента, по зависимости (2.20) рассчитать суммарную

площадь проходного сечения сопел инструмента, которые можно разместить по окружности диаметра соплового кольца инструмента. Диаметры шаров выбираются конструктивно из стандартного ряда 5...30 мм. Минимальный диаметр заготовки 15 мм, максимальный – 500 мм. Диаметры сопел предварительно выбираются также конструктивно исходя из геометрических построений на чертеже.

Следует учитывать, что для упрочняющей ПЦО нежестких деталей с высоким качеством точности (Н6) диаметрального размера применение шаров больших диаметров нецелесообразно. Для гильз ДВС, например, при номинальном диаметре гильзы 110 мм следует применять шары диаметром 7...9 мм из-за высоких требований по диаметральной точности и цилиндричности до 0,02 мм. Диаметр сопел – от 1,5 до 2 мм. Сопла меньшего диаметра (1,5 мм) расположены на боковых стенках камеры расширения, а в плоскости вращения шаров диаметр сопел равен 2 мм. Такое расположение сопел обеспечивает шарам многоосное вращение, уменьшая их износ. Благодаря этому повышается производительность процесса ПЦО за счет увеличения частоты вращения.

Таким образом,

$$F_{\text{и}} \geq \frac{F_{\text{с}}}{0,3...0,5}. \quad (2.21)$$

Зная площадь сопел $F_{\text{с}}$, можно определить диаметр трубопровода:

$$d_{\text{тр}} \geq \sqrt{\frac{4F_{\text{и}}}{\pi}}. \quad (2.22)$$

Для достижения максимальной мощности воздушного потока и полного ее использования необходимо принимать внутренний диаметр трубопровода цеховой магистрали большим или равным расчетному $d_{\text{тр}}$, иначе резко снизится коэффициент полезного действия инструмента для ПВДО.

Увеличение диаметра трубопровода по сравнению с расчетным позволит стабилизировать величину давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту (что также целесообразно в случае колебания расхода сжатого воздуха в пневмосистеме цеховой магистрали), исключая применение ресивера. Последний должен применяться в случае проектирования многопозиционного станка для финишной упрочняющей ПЦО конкретных заготовок цилиндров.

Пример – В осевую полость инструмента для суперфинишной ПЦО поступает сжатый воздух под давлением $P_{\text{и}} = 198066$ Па, давление в камере расширения инструмента составляет $P_{\text{к.р.}} = 98840$ Па при температуре $T = 300$ К. Номинальный диаметр обрабатываемого отверстия $D = 100$ мм. В инструменте применены цилиндрические сопла в количестве $z_c = 6$ шт. (коэффициент расхода $\mu = 0,815$) диаметром $d_c = 3$ мм. Зазоры для выхода отработавшего воздуха в атмосферу $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,75$ мм. Определить диаметр инструмента $D_{\text{и}}$, диаметр трубопровода $d_{\text{тр}}$ для подвода сжатого воздуха в осевую полость, массовый M и объемный V расходы воздуха.

Решение

1 Определяем диаметр инструмента:

$$D_{\text{и}} = D - 2\lambda_1 = 100 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} = 98,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2 Рассчитываем суммарную площадь проходного сечения сопел инструмента:

$$F_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot z_c = \frac{\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 6 = 42,408 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

3 Определяем площадь проходного сечения $F_{\text{и}}$ и диаметр трубопровода $d_{\text{тр}}$:

$$F_{\text{и}} \geq \frac{F_c}{0,3 \dots 0,5} = \frac{42,408 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 141 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$d_{\text{тр}} \geq \sqrt{\frac{4F_{\text{и}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 141 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Расчетный диаметр трубопровода следует скорректировать в соответствии со стандартами на трубы и трубопроводную арматуру. Во избежание отрицательных результатов обработки следует выбирать диаметр условного прохода трубопровода по стандарту, учитывая, что он равен или больше расчетного.

4 Вычисляем массовый расход воздуха в инструменте:

$$M = F_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \rho_1 \cdot P_{\text{и}} \cdot \left[\left(\frac{P_{\text{к.р.}}}{P_{\text{и}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{\text{к.р.}}}{P_{\text{и}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} =$$

$$= 42,408 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot 2,3 \cdot 198066 \cdot \left[\left(\frac{98840}{198066} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{98840}{198066} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} =$$

$$= 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

При этом плотность воздуха в сечении на входе в осевую полость

$$\rho_1 = \frac{P_{\text{и}}}{RT} = \frac{198066}{287,3 \cdot 300} = 2,3 \text{ кг/м}^3.$$

Определим действительный массовый расход:

$$M_{\text{д}} = M \cdot \mu = 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,815 = 3,58 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

5 Вычисляем действительный объемный расход воздуха в инструменте:

$$V_{\text{д}} = \frac{M_{\text{д}}}{\rho_{\text{с}}} = \frac{3,58 \cdot 10^{-5}}{1,15} = 3,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с.}$$

При этом плотность воздуха в выходном сечении сопла

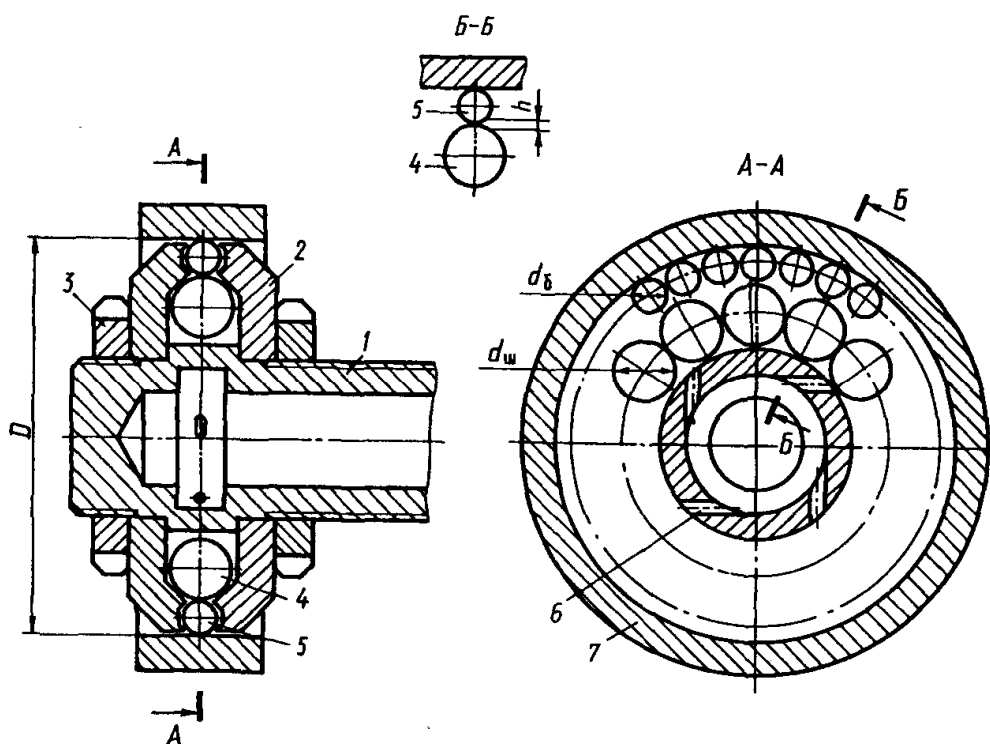
$$\rho_{\text{с}} = \frac{P_{\text{к.р.}}}{RT} = \frac{98840}{287,3 \cdot 300} = 1,15 \text{ кг/м}^3.$$

3 Механика процессов импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки

3.1 Определение основных количественных параметров процесса при обработке внутренних поверхностей вращения

Для определения основных количественных параметров импульсно-ударного процесса обработки на примере инструмента импульсно-ударного действия (рисунок 3.1) примем следующие допущения:

- в камере расширения инструмента размещено максимально возможное количество шаров данного диаметра;
- во внешней кольцевой канавке инструмента находится максимально возможное количество бойков данного диаметра;
- шары и бойки в процессе работы инструмента перемещаются равномерно;
- в процессе работы каждый шар контактирует с каждым бойком.



1 – оправка инструмента; 2 – боковая шайба; 3 – гайка крепления боковых шайб; 4 – приводящий шар; 5 – боек; 6 – сопло; 7 – обрабатываемая заготовка; d – диаметр обрабатываемой поверхности отверстия; $d_{ш}$ – диаметр шара; $d_{б}$ – диаметр бойка; h – порог зацепления (разность между наиболее удаленной от оси обрабатываемой поверхности отверстия точкой шара и наименее удаленной от оси отверстия точкой бойка)

Рисунок 3.1 – Упрощенная схема импульсно-ударного инструмента

Примем условные обозначения: $z_{ш}$, $z_{б}$ – количество шаров и бойков соответственно; $n_{ш}$, $n_{б}$, $n_{д}$ – частоты вращения приводящих шаров, шаров-бойков и обрабатываемой детали, мин^{-1} ; D – диаметр обрабатываемого отверстия, мм; ρ_0 – радиус отпечатка (лунки) от удара бойка, мм; S – подача инструмента на оборот детали, мм/об; N_t – количество ударов бойков в единицу времени, уд/мин; N_F – количество ударов бойков на единицу площади, уд/мм²; S_0 – суммарная площадь отпечатков от ударов бойков в единицу времени, мм²/мин [17].

Количество ударов бойков в единицу времени N_t , уд/мин, прямо пропорционально количеству шаров, количеству бойков и разности частоты вращения шаров и бойков:

$$N_t = z_{ш} \cdot z_{б} (n_{ш} - n_{б}). \quad (3.1)$$

Количество ударов бойков на единицу площади N_F , уд/мм², получим, разделив величину N_t на площадь поверхности детали, перекрываемую бойками за 1 мин:

$$N_F = \frac{z_{ш} \cdot z_{б} \cdot (n_{ш} - n_{б})}{\pi \cdot D \cdot n_{ш}}. \quad (3.2)$$

Для определения суммарной площади отпечатков, получаемой за 1 мин (для случая, когда отпечатки не перекрывают друг друга), умножим значение N_t на площадь одного отпечатка:

$$S_0 = N_t \cdot \pi \cdot \rho_0^2 = \pi \cdot z_{ш} \cdot z_{б} \cdot (n_{ш} - n_{б}) \cdot \rho_0^2. \quad (3.3)$$

Формулы (3.1)...(3.3) содержат переменную величину $n_{ш} - n_{б}$. При этом следует отметить, что $n_{б}$ значительно меньше $n_{ш}$, и поэтому влияние $n_{б}$ на параметры обработки мало. Частота вращения шаров $n_{ш}$ зависит в основном от давления и расхода сжатого воздуха, которые можно изменять, следовательно, при работе импульсно-ударного инструмента можно осуществить простое бесступенчатое регулирование параметров N_t , N_F и S . Учитывая, что центробежная сила шаров и скорость их кругового перемещения также пропорциональны $n_{ш}$, сделаем вывод, что обусловливаемые этими параметрами глубину и шаг отпечатков на обрабатываемой поверхности от воздействия бойков, являющихся деформирующими элементами, также можно регулировать, изменяя давление сжатого воздуха, поступающего в инструмент.

Сравнение импульсно-ударной обработки с пневмоимпульсной [13], гидродробеструйной [9], пневмодробеструйной [20] показывает, что она более проста, универсальна, легко поддается автоматизации, деталь после обработки получается сухой и чистой.

При исследовании поверхностей, обработанных шлифованием, полированием, дробеструйной обработкой, электрофизическими и химическими способами, гидроабразивной доводкой, установлено, что наибольшая толщина слоя смазки обнаруживается на поверхностях деталей, обработанных свободными рабочими телами (абразивами), что подтверждает повышенную маслоспособность этих поверхностей [35, 52]. В значительной мере изложенное относится и к импульсно-ударной обработке.

3.2 Влияние кинематических и динамических характеристик на процесс обработки деталей

Кинематика и динамика процесса импульсно-ударной упрочняющей обработки определяют качество поверхностей деталей, их надежность и долговечность в эксплуатации. На рисунке 3.1 представлена схема импульсно-ударного инструмента.

Кинематика процесса. При исследовании были приняты следующие допущения: шары и бойки в процессе работы равномерно расположены по окружности; шары и бойки движутся равномерно; центры шаров и бойков размещены в одной плоскости; каждый шар контактирует с каждым бойком.

Так как шары и бойки движутся равномерно по окружности и в то же время перемещаются равномерно вдоль оси вращения со скоростью подачи v_s , то законом их движения (без учета соударения) является винтовая линия (рисунок 3.2), выражаемая формулой [17]

$$\vec{r} = R \cdot (\cos \omega \cdot t \cdot \vec{i} + \sin \omega \cdot t \cdot \vec{j}) + v_s \cdot t \cdot \vec{k}, \quad (3.4)$$

где ω – угловая скорость вращения;

t – время;

\vec{r} – радиус-вектор точки M ;

\vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – единичные векторы координатных осей X , Y , Z ;

R – переменный радиус перемещения центра шара или бойка.

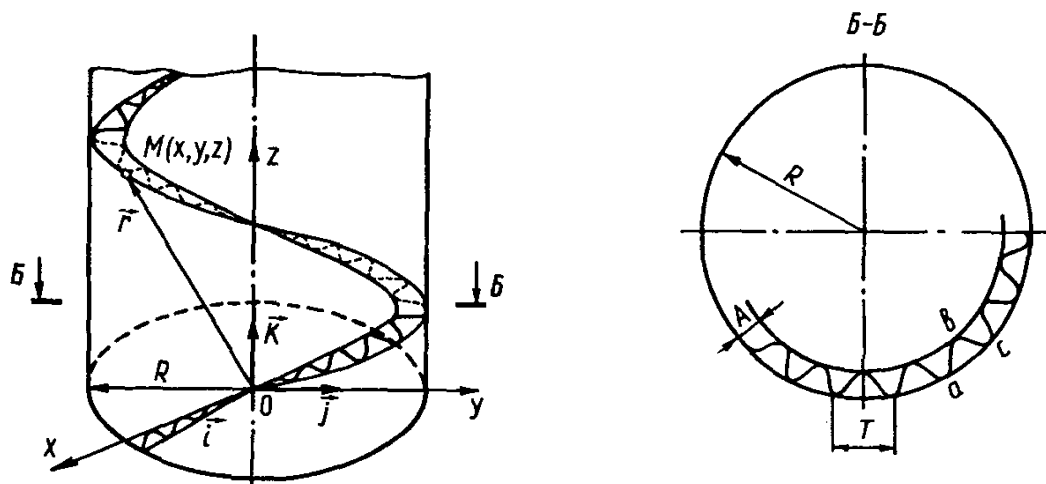


Рисунок 3.2 – Траектория перемещения центров шаров и бойков в процессе обработки

В параметрическом виде

$$X = R \cdot \cos \omega \cdot t; \quad Y = R \cdot \sin \omega \cdot t; \quad Z = v_s \cdot t. \quad (3.5)$$

С учетом соударения шаров и бойков величина R не является постоянной, а изменяется от $R_{ш}$ (до соударения) до $A_{ш}$ (после соударения) для шаров и от $R_{б}$ до $A_{б}$ для бойков ($A_{ш}$ и $A_{б}$ – амплитуды колебаний после соударения шаров и бойков).

Проекция траектории центра шара на плоскость XOY (см. рисунок 3.2) имеет вид:

$$X^2 + Y^2 = [R - A \cdot f(t)]^2, \quad (3.6)$$

где $f(t)$ – некоторая периодическая функция, зависящая от числа соударений шаров и бойков.

Определим закон движения шара после соударения. Полагаем, что шары и бойки взаимодействуют между собой абсолютно упруго (т. е. энергия на их деформацию не расходуется), а с обрабатываемой поверхностью бойки взаимодействуют упруго (т. е. часть их механической энергии расходуется на деформацию детали). При равномерном движении по окружности на бойки действуют две направленные радиально и в противоположные стороны силы: центробежная сила $\vec{F}_ц$ и реакция детали \vec{N}' (силы трения качения о стенки направляющих не учитываем, т. к. они

носят периодический характер и значительно меньше центробежных сил). Аналогично на шары действуют только $\vec{F}_ц$ и реакция направляющих. До соударения эти силы взаимно уравновешиваются. В процессе соударения изменяется направление окружной скорости шаров, т. е. они начинают двигаться по траектории, отличающейся от окружности, под действием лишь силы инерции, которую можно считать постоянной ввиду небольшой амплитуды колебаний A по сравнению с радиусом вращения. В этом случае уравнение движения запишем в виде

$$\vec{F}_ц = m \frac{dv}{dt}, \quad (3.7)$$

где m – масса шара;

v – скорость его центра.

Интегрируя (3.7), получим $F \int dt = m \int dv$, тогда $v = (F/m)t + C_1$.

Так как $v = dS/dt$ (S – путь движения шаров), можем записать

$$dS/dt = F \cdot t / m + C_1, \quad (3.8)$$

откуда

$$dS = (F/m) \cdot t \cdot dt + C_1 \cdot dt. \quad (3.9)$$

Интегрируя (3.9), получим

$$S = \frac{F}{2m} \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2, \quad (3.10)$$

где C_1 – скорость центра шара после соударения, $C_1 = v_0$;

C_2 – начальное положение точки, $C_2 = S_0$.

Уравнение (3.10) показывает, что законом движения центров шаров после соударения является парабола, т. е. шары совершают ряд периодических колебательных движений с некоторым периодом T и амплитудой A . Заменяя параболическую траекторию синусоидальной, совпадающей с действительной кривой в точках a, b, c (см. рисунок 3.2), получим

$$S = f(t) = A_{ш} \cdot \sin^2 B_{ш} \cdot t, \quad (3.11)$$

где $B_{ш}$ – частота колебаний шара, зависящая от числа шаров и бойков, упругости обрабатываемой детали и направляющих, давления

сжатого воздуха и других параметров инструмента и процесса обработки.

Функция $R(t)$ имеет вид $R(t) = R - A_{\text{ш}} \cdot \sin^2 B_{\text{ш}} \cdot t$. Запишем уравнения траектории центров тяжести шаров:

$$\begin{aligned} X &= \left(R_{\text{ш}} - A_{\text{ш}} \cdot \sin^2 B_{\text{ш}} \cdot t \right) \cdot \cos \omega_{\text{ш}} \cdot t ; \\ Y &= \left(R_{\text{ш}} - A_{\text{ш}} \cdot \sin^2 B_{\text{ш}} \cdot t \right) \cdot \sin \omega_{\text{ш}} \cdot t ; \\ Z &= v_{\text{Sш}} \cdot t. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Уравнения траектории центров тяжести бойков будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} X &= \left(R_{\text{б}} - A_{\text{б}} \cdot \sin^2 B_{\text{б}} \cdot t \right) \cdot \cos \omega_{\text{б}} \cdot t ; \\ Y &= \left(R_{\text{б}} - A_{\text{б}} \cdot \sin^2 B_{\text{б}} \cdot t \right) \cdot \sin \omega_{\text{б}} \cdot t ; \\ Z &= v_{\text{Sб}} \cdot t. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Динамика процесса. Теорию прямого удара двух тел вращения, в частности шара с цилиндром, разработал проф. А. Н. Динник [53]. Для определения динамических характеристик процесса обработки наружных поверхностей вращения центробежным раскатником создана теория косоуго (тангенциального) удара двух тел: шара, вращающегося вокруг оси, не совпадающей с его центром, и вала, вращающегося вокруг собственной оси [54, 184].

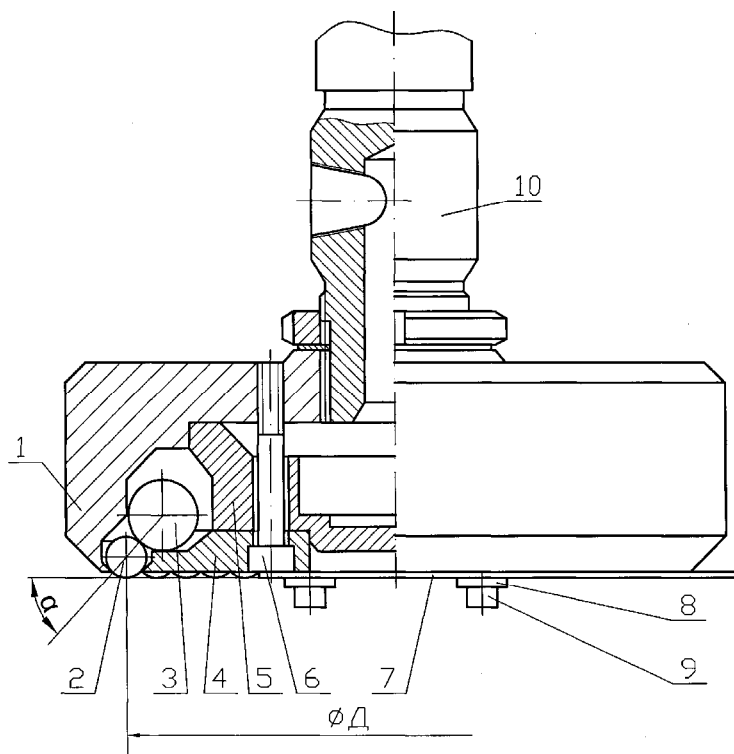
В процессе работы импульсно-ударного инструмента имеет место более сложный случай ударного воздействия трех тел вращения: шаров, бойков, также имеющих сферическую форму, и внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой детали.

Достаточно полно динамика процесса импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки внутренних поверхностей вращения описана в [14].

3.3 Процессы и инструменты для обработки плоских поверхностей

В основе ПВДО плоской поверхности лежит импульсно-ударное воздействие деформирующих шаров (первый ряд), получающих ударные импульсы от приводящих шаров (второй ряд). И те, и другие совершают вращательные движения по круговой траектории. Приводом для concentрично расположенных приводящих шаров является сжатый воздух, который направляется тангенциально расположенными по окружности соплами при его адиабатическом истечении. Деформирующие шары располагаются свободно (насыпью) в кольцевой камере корпуса инструмента. Приводящие шары имеют бóльшую массу по сравнению с деформирующими. Благодаря турбулентному кольцевому потоку сжатого воздуха все шары интенсивно охлаждаются, что обуславливает их значительную стойкость, а следовательно, и стойкость инструмента.

Принцип работы пневмонакатника, представленного на рисунке 3.3, состоит в следующем.



1 – корпус; 2 – деформирующие шары; 3 – приводящие шары; 4 – диск; 5 – стакан;
6 – винты; 7 – экран; 8 – шайба; 9 – винт; 10 – хвостовик

Рисунок 3.3 – Чертеж (упрощенный) пневмонакатника для обработки плоских поверхностей

Заготовку подводят к инструменту (или наоборот) до соприкосновения с деформирующими шарами. Создается небольшой вертикальный натяг a деформирующих шаров с обрабатываемой поверхностью, в результате чего образуется зацепление между деформирующими и приводящими шарами. Включают подачу сжатого воздуха к приводящим шарам 3 от источника питания через осевой канал инструмента и каналы-сопла. Приводящие шары 3, взаимодействуя, приводят в движение деформирующие шары 2, которые наносят удары по обрабатываемой поверхности заготовки, перемещающейся относительно неподвижного инструмента. Угловые скорости приводящих и деформирующих шаров разные, но направлены в одну сторону.

Для снижения непроизводительных затрат энергии предусмотрена [55] траектория движения приводящих шаров 3, исключая их контакт с деформирующими шарами в нерабочей зоне.

Для повышения производительности обработки деформирующим шаром 2 сообщают ускорение путем непосредственного воздействия на них сжатого воздуха, направляемого соплами [56].

Дальнейшее развитие конструкций инструмента для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей представлено в разделе 4 (таблица 4.4, поз. 808 и 809) [57–59].

Для одновременной обработки двух параллельных, обращенных друг к другу плоских поверхностей разработана конструкция пневмонакатника импульсно-ударного действия, представленная в [94], позволяющая при обработке формировать новый микрорельеф в виде сетки равномерно расположенных на всей обрабатываемой поверхности лунок – полностью регулярный микрорельеф (ПРМР).

Определение ударной реакции приводящего и деформирующего шаров при обработке плоских поверхностей, а также ударной реакции обрабатываемой поверхности достаточно подробно изложено в [14].

3.4 Методика определения КПД инструмента и подводящей системы для ИУ ПВДО плоских поверхностей, учитывающая их аэродинамические характеристики

Общепринято эффективность машин и инструментов оценивать КПД. Однако такой подход неточен, т. к. в ряде случаев электрифицированный инструмент с высоким КПД «проигрывает» пневмоинструменту с низким КПД в безопасности, надежности, производительности, стоимости эксплуатационных расходов. Очевидно, что эффективность инструмента – комплексный показатель, учитывающий не

только вышеперечисленные составляющие, среди которых КПД зачастую является не самым важным, но и способность решать задачу, которую не могут выполнить другие инструменты.

При определении КПД инструмента примем следующие допущения:

1) скорость движения шаров не зависит от их количества;
 2) сила воздействия воздушного потока на любой из шаров одинакова и постоянна в любой точке траектории движения в кольцевой камере пневмоинструмента;

3) шары движутся вдоль кольцевой камеры с постоянной скоростью;

4) приводящие шары не контактируют между собой.

Выражение для КПД пневмоинструмента имеет вид [61]:

$$\eta_{\text{ПИ}} = \eta_{\text{ПС}} \cdot \eta_i = \frac{N_i}{N_{\text{теор}}} \cdot \frac{N_{\text{пол}}}{N_i}, \quad (3.14)$$

где $\eta_{\text{ПИ}}$ – КПД пневмоинструмента;

η_i – внутренний КПД пневмоинструмента;

$\eta_{\text{ПС}}$ – КПД подводящей системы (рисунок 3.4);

N_i – внутренняя мощность пневмоинструмента, Вт;

$N_{\text{теор}}$ – теоретическая мощность пневмоинструмента, определенная без потерь в подводящей системе, Вт;

$N_{\text{пол}}$ – мощность, которой обладают шары в потоке сжатого воздуха, Вт.

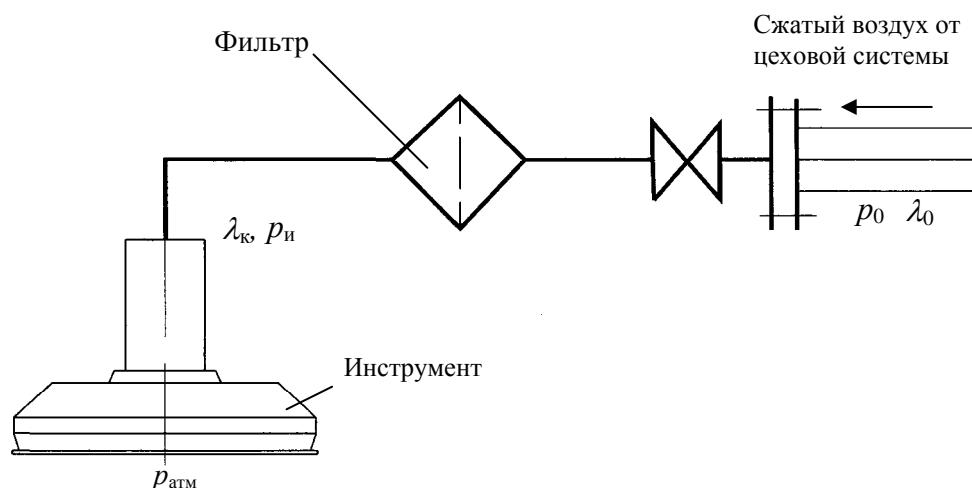


Рисунок 3.4 – Схема подвода сжатого воздуха из цеховой трубы к инструменту

Согласно [61]

$$\eta_{\text{ПС}} = \frac{N_i}{N_{\text{теор}}} = \sigma_{0-1} \left(\frac{1 - \left(\Pi_{\text{расп}} \cdot \sigma_{0-1} \right)^{\frac{1-k}{k}}}{1 - \Pi_{\text{расп}}^{\frac{1-k}{k}}} \right), \quad (3.15)$$

где $\Pi_{\text{расп}}$ – заданная степень понижения давления на пневмоприводе,

$$\Pi_{\text{расп}} = \frac{p_0}{p_2}; \quad (3.16)$$

p_0 – давление сжатого воздуха в цеховом воздуховоде;

p_2 – давление воздуха в камере расширения инструмента;

σ_{0-1} – коэффициент сохранения полного давления в подводящей системе,

$$\sigma_{0-1} = p_{\text{и}} / p_0 = q(\lambda_0) / q(\lambda_1); \quad (3.17)$$

$p_{\text{и}}$ – полное давление воздуха на выходе трубопровода подводящей системы, Па;

λ_0, λ_1 – приведенные скорости воздушного потока во входном и выходном сечениях трубопровода подводящей системы;

$q(\lambda_0), q(\lambda_1)$ – плотности тока во входном и выходном сечениях трубопровода подводящей системы.

Для нахождения σ_{0-1} определяем последовательно $M, \lambda_0, \lambda_1, q(\lambda_0), q(\lambda_1)$.

При $p_{\text{атм}} / p_2 < 0,528$ (где $p_{\text{атм}}, p_2$ – атмосферное давление и полное давление воздуха в осевой полости пневмоинструмента, Па) формула для вычисления массового расхода воздуха M , кг/с, имеет вид:

$$M = \mu \cdot S_c \cdot \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot p_2 \cdot \rho_2}, \quad (3.18)$$

где μ – коэффициент расхода сопла;

S_c – суммарная площадь сопел, м²;

ρ_2 – плотность воздуха при давлении p_2 , кг/м³;

k – показатель адиабаты воздуха, $k = 1,4$.

Скорость воздушного потока v_0 , м/с, при входе в трубопровод подводящей системы

$$v_0 = \frac{M}{\rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_y^2}{4}}, \quad (3.19)$$

где D_y – диаметр условного прохода вентиля на входе в подводящую систему, м;

ρ_0 – плотность воздуха при входе в трубопровод, кг/м³.

Приведенная скорость воздушного потока во входном сечении трубопровода подводящей системы

$$\lambda_0 = \frac{v_0}{a_{кр}}, \quad (3.20)$$

где $a_{кр}$ – критическая скорость истечения воздуха из сопла,

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R \cdot T}; \quad (3.21)$$

R – газовая постоянная, для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К);

T – температура торможения при p_0 , К.

Приведенная скорость воздушного потока в выходном сечении трубопровода подводящей системы

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\lambda_0^2} - \chi_{тр} + 2 \ln \frac{\lambda_0}{\lambda_1}}}, \quad (3.22)$$

где $\chi_{тр}$ – приведенная длина трубы [14],

$$\chi_{тр} = \frac{2k}{k+1} \cdot \xi_{тр} \cdot \frac{\ell_{тр.пр}}{d_{тр}} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_1^2} + 2 \ln \frac{\lambda_0}{\lambda_1}, \quad (3.23)$$

где $\xi_{тр}$ – коэффициент гидравлического трения в подводящей системе [14];



$\ell_{\text{тр.пр}}$ – сумма длин трубопровода и эквивалентной трубы, заменившей местные сопротивления (фильтр, кран) [14], м;

$d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр трубопровода, м.

Плотности тока во входном и выходном сечениях трубопровода определяем по формуле

$$q(\lambda) = \lambda \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (3.24)$$

Результаты расчета зависимостей $\eta_{\text{ПС}}$ при $P_{\text{расп}} = 2,4$ от λ_1 для значений $\chi_{\text{тр}} = 5, 10, 15$ представлены на рисунке 3.5.

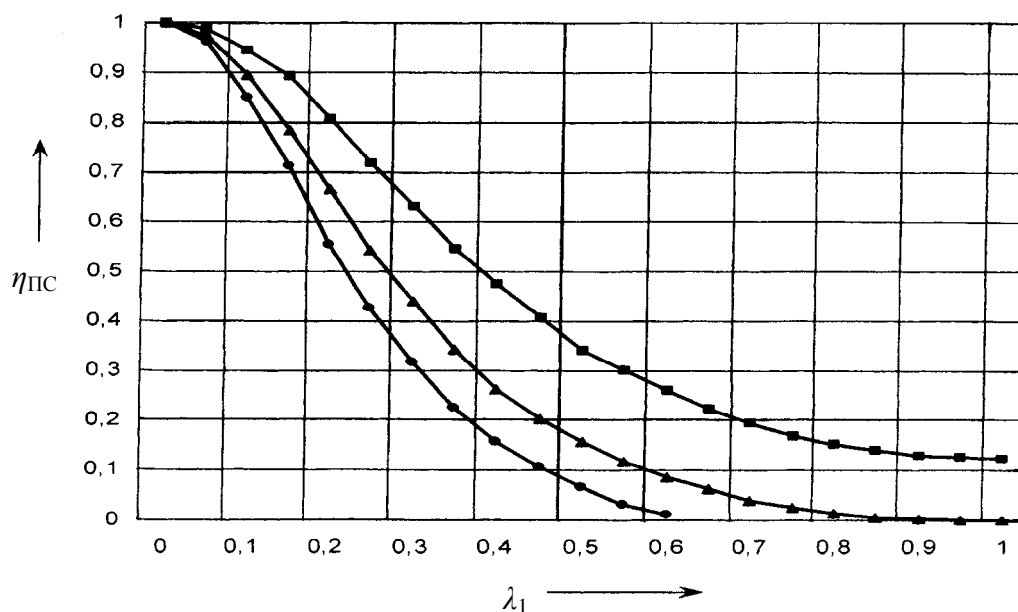


Рисунок 3.5 – Зависимость КПД подводящей системы от приведенной скорости λ_1

Внутренний КПД пневмоинструмента

$$\eta_i = \frac{N_{\text{пол}}}{N_i}. \quad (3.25)$$

Внутреннюю мощность пневмоинструмента N_i , Вт, рассчитаем по формуле [62]

$$N_i = M \cdot \frac{v_{\text{п.в.}}^2}{2}, \quad (3.26)$$

где $v_{п.в.}$ – скорость потока воздуха при истечении из сопла, м/с.

При $p_{атм} / p_2 < 0,528$ скорость потока воздуха

$$v_{п.в.} = \mu \cdot a_{кр} . \quad (3.27)$$

Мощность приводящих шаров $N_{пол}$, Вт, определяется как [62]

$$N_{пол} = F_{ш} \cdot v_{ш} , \quad (3.28)$$

где $F_{ш}$ – сила воздействия воздушного потока на шар, Н;

$v_{ш}$ – скорость шара-ударника [63],

$$v_{ш} = v_{п.в.} \left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot m_{ш} \cdot (f_1 + f_2) \cdot 0,5}{C_x \cdot \rho \cdot S_{ш} \cdot R_{ш}}} \right)^{-1} ; \quad (3.29)$$

C_x – коэффициент лобового сопротивления шара-ударника [63];

$m_{ш}$ – масса шара-ударника, кг;

$S_{ш}$ – площадь миделевого сечения шара-ударника, м²;

$R_{ш}$ – радиус окружности расположения центров шаров-ударников в пневмоинструменте, м;

f_1 – коэффициент трения скольжения при трении приводящего шара по стальному корпусу пневмоинструмента, $f_1 = 0,22$;

f_2 – коэффициент сопротивления при контактировании приводящего шара с деформирующими.

Предположим, что $f_{2(max)} \approx 0,6$, тогда

$$F_{ш} = C_x \cdot 0,5 \rho \cdot (v_{п.в.} - v_{ш})^2 \cdot S_{ш} , \quad (3.30)$$

где ρ – плотность воздуха на выходе из сопла,

$$\rho = 0,5 \rho_{атм} \cdot \left(\frac{98066,5 + p_2}{98066,5} \right) , \quad (3.31)$$

при этом

$$\rho_{атм} = \frac{p_{атм}}{R \cdot T} . \quad (3.32)$$

После подстановки всех найденных зависимостей в формулу (3.25) получаем математическую модель для определения внутреннего КПД инструмента импульсно-ударного действия как для наружных, так и для внутренних поверхностей [62]:

$$\eta_i = \frac{0,392C_x \cdot (0,569 + 5,807 \cdot 10^{-6} \cdot p_2) \cdot (316,94\mu - v_{ш})^2 \cdot d_{ш}^2 \cdot v_{ш}}{158,97M \cdot \mu}. \quad (3.33)$$

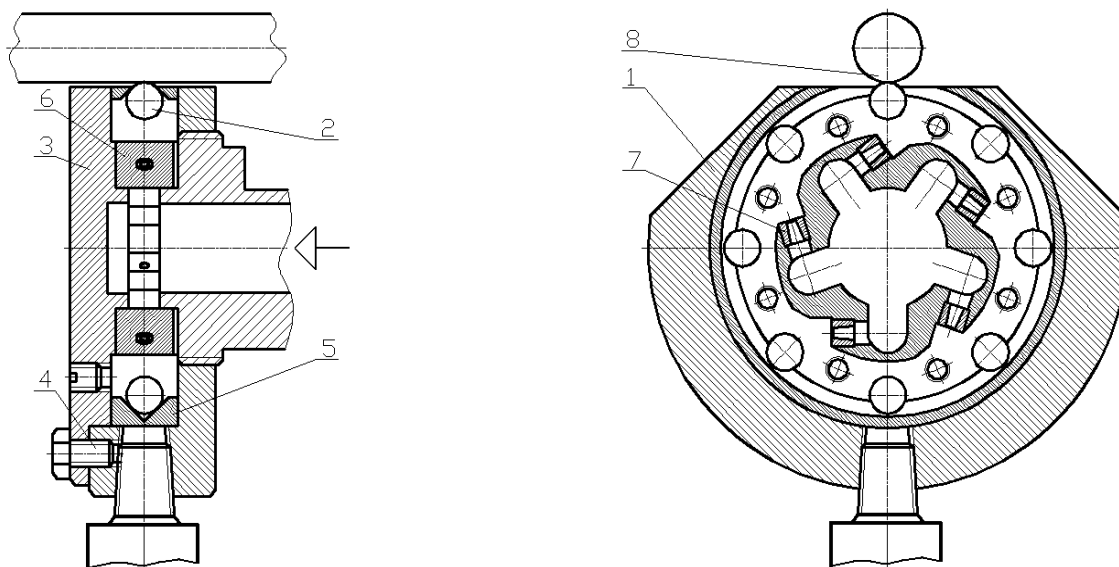
На основании данных зависимостей разработана методика определения КПД инструмента, учитывающая его аэродинамические характеристики. Использование методики позволило улучшить аэродинамические параметры инструмента, т. е. подобрать оптимальные число и диаметры сопел конической формы с коэффициентом расхода 0,92, диаметры шаров-ударников, обеспечивающие сочетание наименьшего расхода воздуха с наибольшей скоростью вращения шаров. На основе внесенных изменений разработан инструмент [56], для которого КПД, учитывающий аэродинамические параметры составил 5,7 %, что на 21 % выше, чем КПД инструмента-прототипа [14].

3.5 Процессы и инструменты для обработки наружных поверхностей вращения

На рисунке 3.6 [153] представлена конструктивная схема инструмента для пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения (валов, штоков и т. п.).

Под действием сжатого воздуха, подводимого от системы питания (не показана) через осевой канал воздухораспределителя 6 и тангенциальные сопла 7, шары 2 начинают совершать орбитальное вращение вокруг оси инструмента. При этом происходит пластическое деформирование обрабатываемой поверхности за счет того, что в зоне обработки шары 2 поочередно наносят удары по заготовке 8.

Профиль беговой дорожки, расположенной в стакане 5 инструмента, выполнен треугольным симметричным, а прорезь находится на расстоянии от центра, меньшем, чем радиус окружности максимального вылета шара, и большем, чем радиус расположения точки контакта шара с обрабатываемой заготовкой. В инструменте вместо цилиндрических применены сопла с коническим поперечным сечением.



1 – корпус; 2 – деформирующие шары; 3 – крышка; 4 – винты; 5 – стакан;
6 – воздухораспределитель; 7 – тангенциальные сопла; 8 – обрабатываемая заготовка

Рисунок 3.6 – Конструктивная схема инструмента для пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения

Такое исполнение инструмента позволяет шарам развивать скорость бóльшую, чем в инструменте-прототипе [14], т. к. исключается нежелательное высокочастотное маятниковое движение шаров поперек направления главного движения, что повышает производительность обработки и увеличивает степень деформационного упрочнения обрабатываемой поверхности. Применение сопел с коническим поперечным сечением позволило увеличить КПД инструмента.

Исследование кинестатических параметров при обработке наружных поверхностей вращения выполнено в [14, 157].

4 Классификация кинематических схем пневмовибродинамической обработки

Совершенствование и создание новых способов механической обработки материалов – одна из основных задач технологии машиностроения. Для обеспечения конкурентоспособности технологий на мировом рынке необходимо, чтобы, наряду с повышением производительности и качества изготовления изделий, разрабатываемые процессы были экологически чистыми. Отмечено, что для реализации таких технологий требуются особые условия, выходящие за рамки только новых кинематических схем. Как правило, принципиально новые технологии возникают на стыке наук. Рассматриваемые, например, в работе процессы обработки возникли на стыке механики, аэродинамики и гидравлики. В связи с этим при анализе отдельно взятого процесса обработки конкретной поверхности заготовки (кинематической схемы) нужно учитывать воздействие рабочей среды на характер движения деформирующих элементов во взаимодействии с их осевым перемещением в зависимости от характеристики обрабатываемого материала и режимов процесса.

Создание новых способов механообработки и формообразования поверхностей основано на фундаментальных работах Г. И. Грановского, В. И. Дикушина, В. Н. Подураева, Е. Г. Коновалова, Д. Кумабе и др. [79, 83]. Академик Е. Г. Коновалов доказал, что в процессе генерации поверхности во времени и пространстве на заготовке образуется и остается своеобразный отпечаток или образ индентора, каждая точка которого может быть точкой, линией, поверхностью [80].

Применительно к рассматриваемым схемам обработки любую поверхность в момент времени t_0 можно представить как результат относительного движения двух образов, составляющих множество с топологической структурой, а топологическое произведение множеств дает поверхность и присущую ей топографию.

В соответствии с рекомендациями академика В. И. Дикушина основным показателем класса кинематических схем является производительность формообразования. Она измеряется площадью поверхности F_ϕ , см²/мин, образующейся при обработке заготовки в единицу времени:

$$F_\phi = \frac{1}{T_\Pi} \sum b_n \cdot l_n, \quad (4.1)$$

где $T_{ц}$ – длительность всего рабочего цикла обработки, мин;
 b_n – длина образующей для каждого инструмента, см;
 l_n – длина направляющей для каждого из n инструментов, см;
 n – количество формообразующих элементов.

Таким образом, количественные изменения периода возникновения образующей или направляющей как следствие комбинирования схем формообразования оказывают существенное влияние на характер этого процесса и топографию поверхности, т. е. посредством кинематики обработки можно влиять на количественную и качественную сторону технологического процесса [79]: не только получать в единицу времени величину поверхности, но и изменять динамику процесса, существенно влияя на качество обработанной поверхности, износ инструмента [80–83].

В работе выполнен анализ, представлена классификация кинематических схем пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки внутренних, наружных поверхностей тел вращения, а также плоских поверхностей заготовок. Большую ценность имеют схемы, которые охватывают возможные технологические операции и область их применения, например обработку цилиндрических, конических, сферических, плоских и других поверхностей (рисунки 4.1...4.4). Это облегчает работу технолога и конструктора, связанную с разработкой технологического задания, проектированием технологии и инструмента для пневмовибродинамической обработки указанных конфигураций рабочих поверхностей различных габаритных размеров заготовок.

Обработку можно осуществлять в автономном приспособлении (без станка) или на токарно-винторезном, вертикально-фрезерном, вертикально-, радиально-сверлильном и других станках. В зону обработки подается, как правило, рабочая среда под давлением, например сжатый воздух. В основу работы положен способ феноменологической классификации [84], который рассмотрен с позиций трехмерного пространства, времени обработки, вида относительного движения заготовки и деформирующих элементов под действием рабочей среды под давлением.

В процессе разработки и анализа структурных кинематических схем изучались их возможности и учитывалась связь кинематики систем станка, устройства, приспособления, которая сообщает обрабатываемой заготовке основные движения, с кинематикой движения деформирующих элементов. Сочетания относительных движений заготовки и деформирующих элементов позволяют создать определенную кинематическую схему пневмовибродинамической обработки.

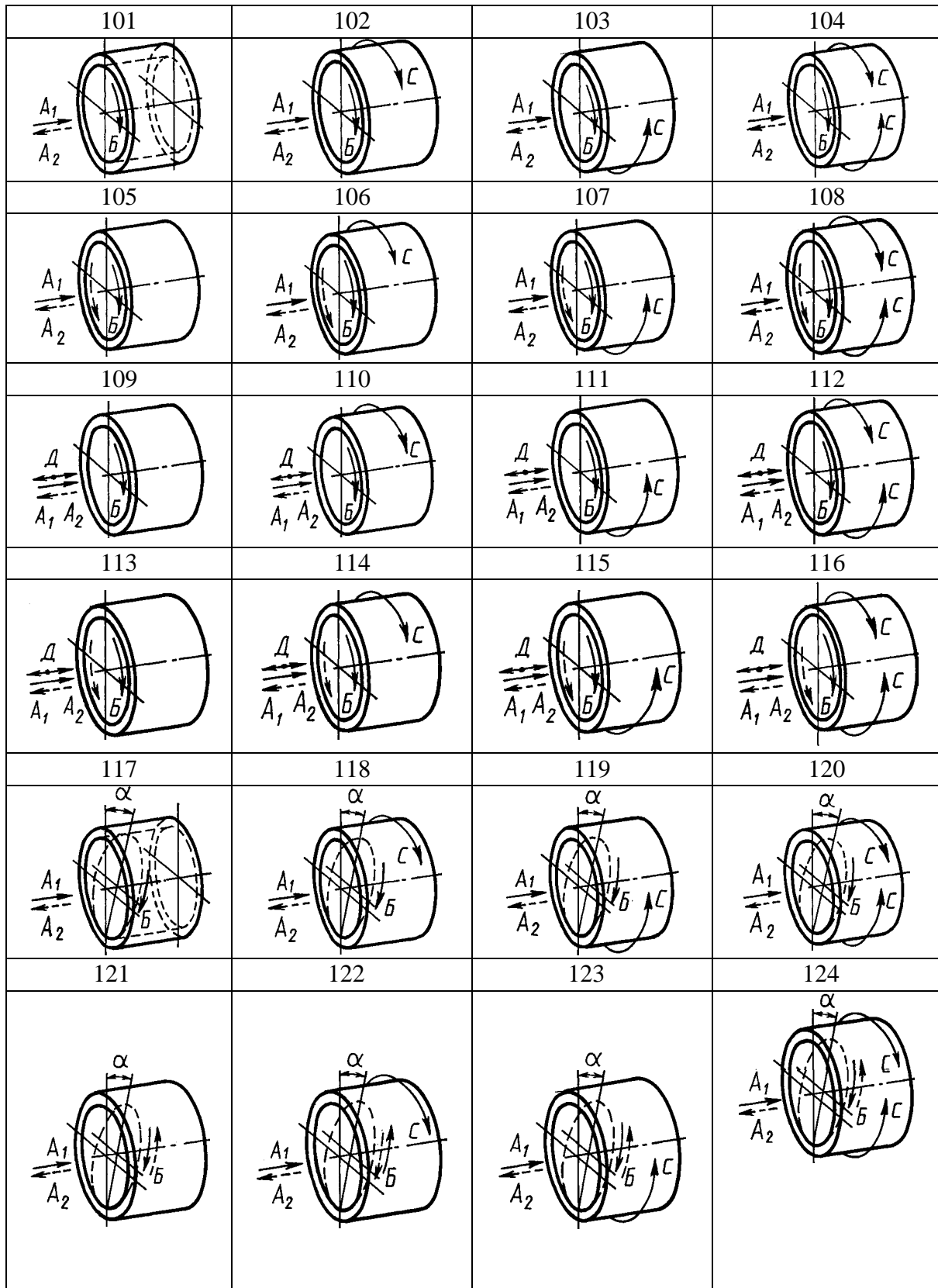
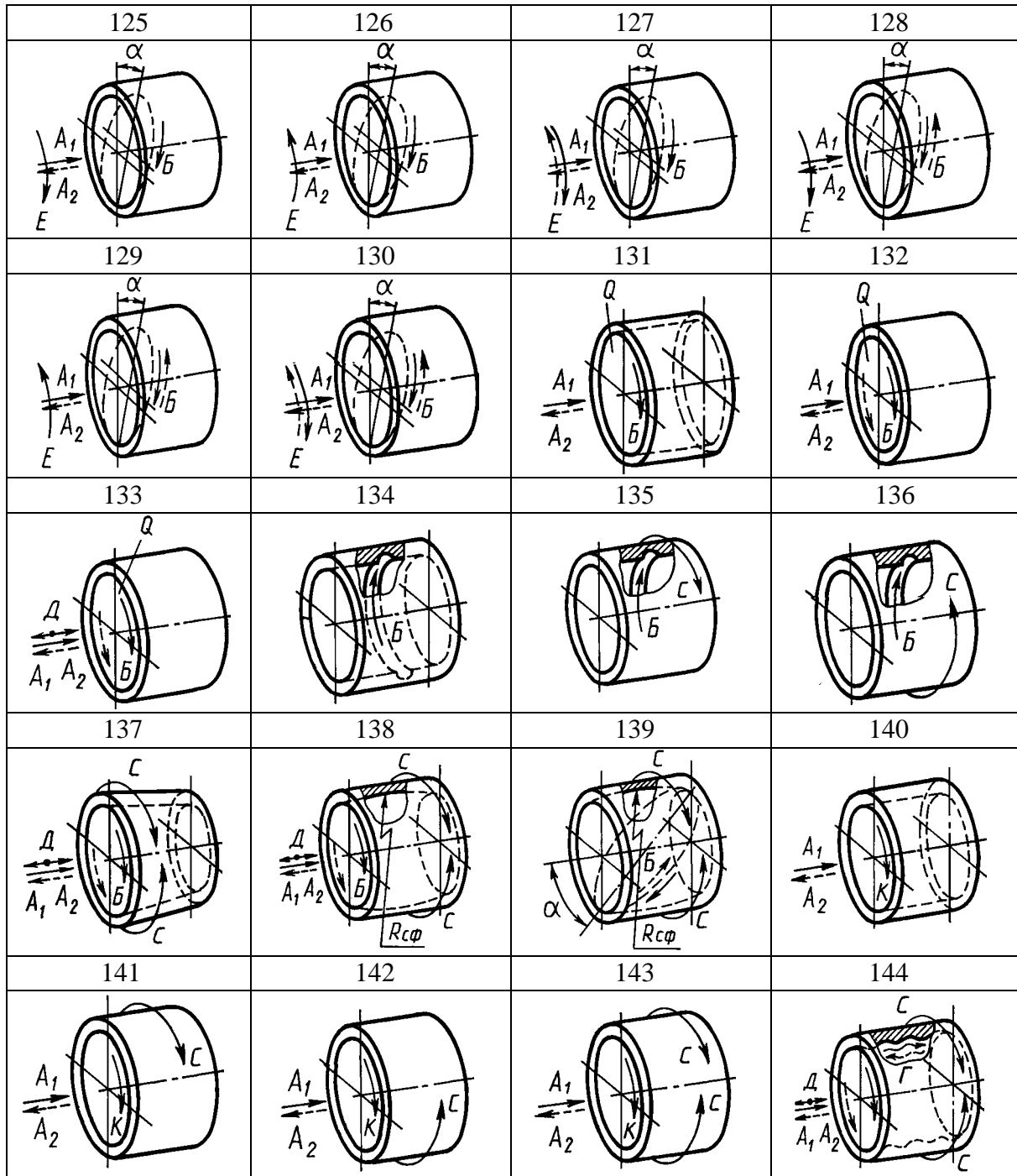


Рисунок 4.1 – Структурные кинематические схемы для пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения



Окончание рисунка 4.1

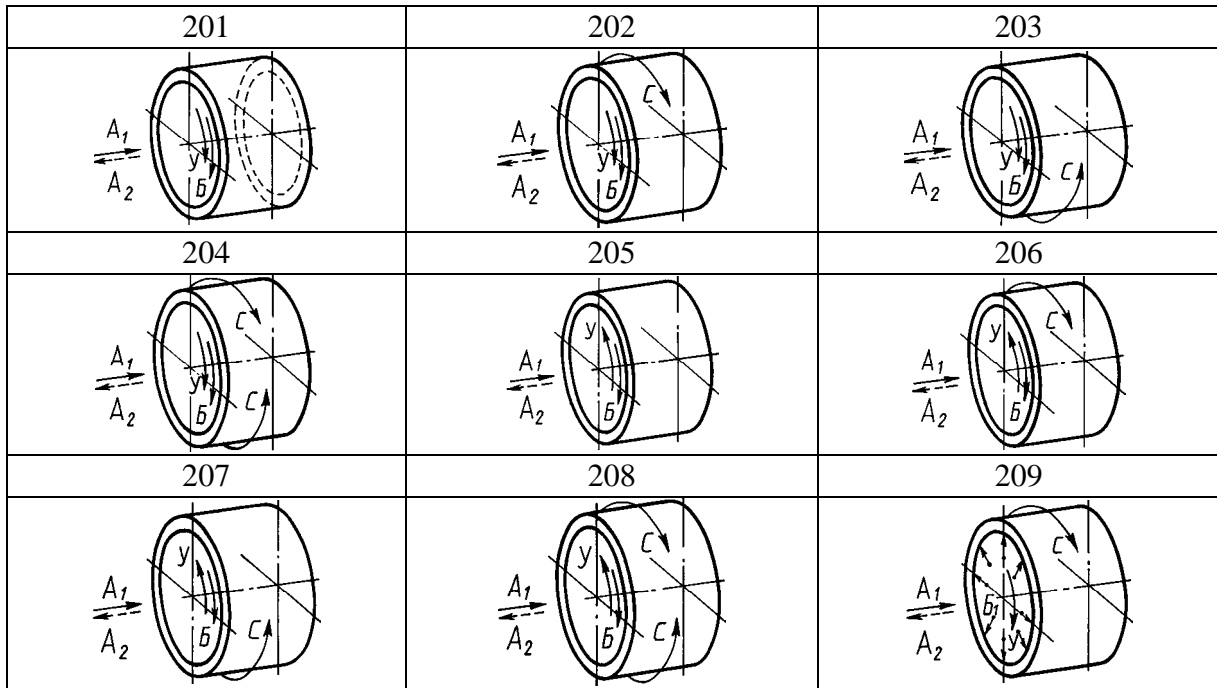


Рисунок 4.2 – Структурные кинематические схемы для импульсно-ударной отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения

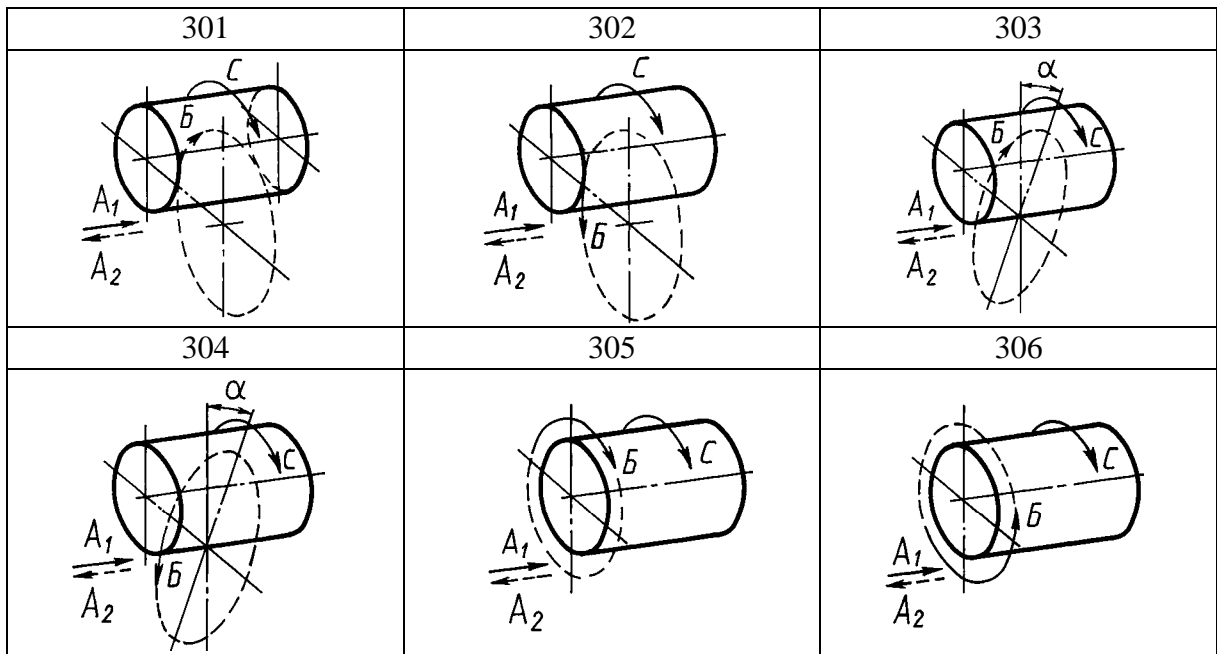


Рисунок 4.3 – Структурные кинематические схемы для пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения

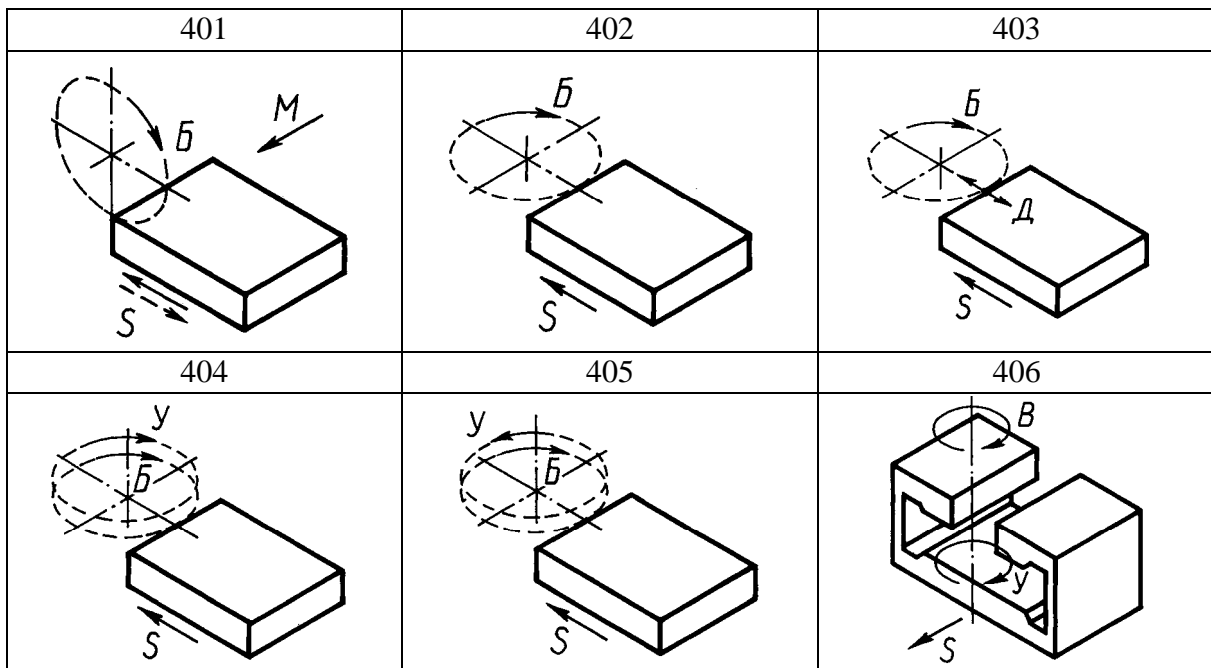


Рисунок 4.4 – Структурные кинематические схемы для пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей

При синтезе кинематических схем (см. рисунки 4.1...4.4) приняты следующие допущения.

1 Любая кинематическая схема представляет собой траекторию относительных движений деформирующих элементов и точки поверхности заготовки в процессе обработки.

2 Классификации рассматриваются только из условия геометрических и кинематических связей, без учета изменений микро- и макрогеометрии поверхностей (A_1 – осевая рабочая подача инструмента; A_2 – осевое перемещение инструмента, которое может быть либо рабочим движением, либо холостым, ускоренным в зависимости от конкретных условий обработки; B – направление вращения деформирующих шаров в инструменте; B_1 – направление радиального перемещения деформирующих шаров; B_2 – направление вращения деформирующих шаров с корпусом инструмента; Γ – перемещение деформирующих шаров вдоль образующей обрабатываемой поверхности; D – осциллирующее движение деформирующих шаров; E – направление вращения корпуса инструмента с расположенными в нем деформирующими шарами; K – направление вращения деформирующих шаров в инструменте при выглаживающем раскатывании; M – подача инструмента на один двойной ход стола станка;

C – направление вращения обрабатываемой заготовки; $У$ – направление вращения приводящих шаров; S – ход стола станка; Q – обрабатываемая поверхность, нормальное сечение которой можно представить овалом Кассини или эллипсом; α – угол наклона плоскости, в которой происходит движение деформирующих шаров).

4.1 Класс кинематических схем пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения

Представленные кинематические схемы (см. рисунок 4.1) разрабатывались от простых до сложных схем формообразования поверхностей. Известно, что отдельно взятая кинематическая схема рассматривается как операция механической обработки. Так, например, кинематическая схема (поз. 101) отличается от другой кинематической схемы (поз. 102) тем, что при перемещении деформирующих шаров по обрабатываемой поверхности в круговом и осевом направлениях (за счет чего происходит формообразование поверхности) заготовка неподвижна. Вращательное движение C заготовки может совпадать (поз. 102) или не совпадать (поз. 103) с направлением вращения B шаров. При осевом перемещении инструмента с подачей A_1 (поз. 104) направление вращения заготовки и деформирующих элементов совпадает. При обратном рабочем перемещении инструмента направление вращения заготовки C противоположно вращению шаров.

Применение той или иной кинематической схемы зависит от условий обработки. Так, кинематическую схему (поз. 101) можно использовать, когда нет необходимости вращательного движения заготовки: в агрегатных, вертикально- и радиально-сверлильных станках, устройствах и т. д.

Интенсифицировать процесс обработки можно за счет усложнения траектории движения деформирующих шаров, например, за счет их дополнительного осциллирующего перемещения (поз. 111...116) [85]. Наличие осциллирующих движений шаров реализовано в относительно простой кинематической схеме (поз. 117...130), где плоскость их движения наклонена под углом α к продольной оси инструмента, совпадающей с продольной осью заготовки [86]. Кинематические схемы, реализующие обработку внутренней поверхности, ее нормальное сечение, которое изображено на рисунке 4.1, можно представить овалом или эллипсом (поз. 131...133).

Возможны варианты обработки внутренних кольцевых канавок (поз. 134...136). Не исключено в отдельных случаях использование при их

обработке осевых перемещений A_1 и A_2 инструмента на незначительную величину, не превышающую ширины кольцевой канавки, когда деформирующие шары имеют радиус меньше радиуса канавки [87].

Относительно просты кинематические схемы, позволяющие осуществить обработку конических и сферических поверхностей заготовок (поз. 137...139). Интерес представляет поз. 138, где поверхность обрабатывается деформирующими шарами, каждый из которых имеет возможность свободного радиального перемещения за наружную поверхность корпуса инструмента на величину меньшую, чем его радиус. Согласно поз. 139, сферическая поверхность заготовки обрабатывается при наклоне плоскости движения деформирующих шаров на угол α таким образом, что за один оборот заготовки происходит обкатывание шарами всей сферической поверхности при неподвижном корпусе инструмента.

Возможно выглаживающее раскатывание поверхности (поз. 140...143) с сочетанием различных кинематических движений A_1 , A_2 ; C и K – направления вращения деформирующих шаров в инструменте, которые обеспечивают их постоянный контакт друг с другом, исключая свободное перемещение, характерное для остальных схем. Шары при их планетарном перемещении слегка тормозят вращение друг друга относительно геометрического центра каждого из них. При их круговом вращении проявляется эффект выглаживающего раскатывания, имеющий преимущества и недостатки [88].

Одним из достоинств процесса обработки является то, что деформирующие шары копируют исходный контур обрабатываемой поверхности (см. рисунок 4.1, поз. 144). Здесь, наряду с известными движениями, показано дополнительное перемещение Γ шаров, копирующих профиль поверхности с волнистой образующей. Представленные на рисунке кинематические схемы являются основными в отличие от тех, которые могут быть созданы в процессе развития этого научного направления.

Используя в конкретных условиях производства необходимую кинематическую схему процесса обработки, можно предусмотреть ее применение в единичном, серийном и массовом производстве. Оборудование в зависимости от типа производства может быть универсальным и специальным с полностью автоматизированным циклом обработки. Предпочтительно вертикальное расположение шпинделя с инструментом – пневмонакатником.

4.2 Класс кинематических схем импульсно-ударной обработки внутренних поверхностей вращения

В отличие от пневмоцентробежной обработки аналогичного класса поверхностей заготовок импульсно-ударная характеризуется тем, что ее схемы имеют два ряда концентрично расположенных в инструменте шаров. Наружный ряд предназначен для деформирования обрабатываемой поверхности заготовки [89].

На рисунке 4.2 представлены основные структурные кинематические схемы процессов для импульсно-ударной отделочно-упрочняющей обработки. Так, например, схема (поз. 201) является наиболее простой. Основные движения в процессе обработки: A_1 – осевая рабочая подача инструмента; A_2 – осевое движение инструмента, которое может быть либо рабочим, либо холостым; B – направление вращения деформирующих шаров в инструменте; $У$ – направление вращения приводящих шаров. Далее (поз. 202) процесс усложняется тем, что, помимо названных движений, заготовке сообщают вращение C относительно ее продольной оси. Это способствует интенсификации процесса обработки. Во всех случаях частота вращения приводящих шаров больше, чем деформирующих. Частоту вращения заготовки можно варьировать в широких пределах, она может быть больше или меньше частоты вращения деформирующих шаров в зависимости от условий обработки.

Рассмотрев кинематическую схему (поз. 204), видим, что при осевом рабочем перемещении инструмента A_1 вдоль оси заготовки возможен вариант, в котором направление вращения деформирующих и приводящих шаров совпадает с направлением вращения заготовки, и вариант, в котором при осевом перемещении A_2 инструмента и однонаправленного перемещения шаров $У$ и B заготовке сообщается вращение в противоположном направлении. Далее рассмотрим кинематические схемы (поз. 205...208). Отличительной особенностью схемы (поз. 209) является то, что деформирующие шары размещены в инструменте, имея возможность радиального перемещения от взаимодействия с приводящими шарами, движущимися по круговой траектории. Заготовке сообщается непрерывное либо дискретное вращательное движение.

4.3 Класс кинематических схем пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения

Схемы обработки наружных поверхностей вращения имеют как общие, так и отличительные признаки по сравнению с пневмоцентробежной и импульсно-ударной структурными кинематическими схемами. В них также имеет место эффект сглаживания микронеровностей обрабатываемой поверхности, но он значительно ниже, чем в рассмотренных выше процессах для обработки внутренних поверхностей вращения. Решение этой проблемы позволит развить и расширить область применения таких процессов в механообработке. Имеющегося объема данных достаточно для разработки на этой базе новых научных идей.

Согласно рисунку 4.3, основными кинематическими движениями являются A_1 и A_2 – осевые перемещения деформирующих шаров вдоль образующей обрабатываемой поверхности, имеющих направление вращения B , как показано на схеме (поз. 301). Возможна одно- и многопроходная обработки. Кинематическая схема обработки (поз. 302) отличается от предыдущей тем, что в ней направление вращения деформирующих шаров и заготовки не совпадает. Некоторое усложнение схемы процесса обработки представлено поз. 303. В данном случае орбитальная плоскость движения деформирующих шаров повернута на угол α . Изменение направления вращения деформирующих шаров по сравнению со схемой (поз. 303) позволило создать новую кинематическую схему (поз. 304). Во всех случаях движение деформирующих шаров осуществлялось средой под давлением.

На схеме (поз. 305) показано движение деформирующих шаров B под действием рабочей среды. Шары движутся, огибая наружный контур тела вращения – заготовки, что способствует более производительной обработке поверхности, т. е. процесс формообразования поверхности более чем на порядок выше, чем при обработке заготовок по рассмотренным схемам. К этому классу относятся и схемы, в которых деформирующие шары имеют возможность радиального перемещения к продольной оси заготовки при ее непрерывном вращении [90]. Таким образом, еще не создана совершенная кинематическая схема для обработки (формообразования) наружных поверхностей вращения, соответствующая производительности процесса пневмоцентробежной обработки.

4.4 Класс кинематических схем пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей

Формообразование плоских поверхностей осуществляется различными способами обработки. На рисунке 4.4 (поз. 401) рассматривается кинематическая схема процесса обработки, где деформирующим шаром сообщают вращательное движение, используя среду под давлением, а заготовке – подачу M на один двойной ход стола, на котором она закреплена [91].

Более совершенной является кинематическая схема (поз. 402), с помощью которой процесс формообразования поверхности осуществляется деформирующими шарами, движущимися в плоскости, параллельной обрабатываемой поверхности. Заготовка закрепляется на столе станка, перемещается с подачей S .

Усложнение траектории движения деформирующих элементов-шаров, их непрерывное осциллирующее перемещение D в процессе обработки при одновременном вращательном движении элементов, имеющих направление движения B в плоскости, параллельной обрабатываемой поверхности, и перемещение заготовки с подачей S показаны на схеме (поз. 403). Обработка заготовки (поз. 402 и 403) может осуществляться как за один, так и за несколько проходов [92].

Изменение кинематики движения деформирующих шаров способствует интенсификации процесса формообразования поверхности и позволяет управлять этим процессом с большим диапазоном характеристик по сравнению с рассматриваемыми кинематическими схемами.

На схемах (поз. 404 и 405) показано формообразование поверхностей деформирующими шарами, имеющими направление вращательного движения B и находящимися под воздействием приводящих шаров, каждый из которых имеет направление вращательного движения U . Плоскости движения деформирующих и приводящих шаров параллельны. Под воздействием приводящих шаров деформирующие перемещаются по поверхности заготовки, имеющей подачу S . На базе кинематической схемы (поз. 406) созданы инструменты [93, 94].

4.5 Класс схем инструментов центробежного действия для обработки внутренних поверхностей вращения

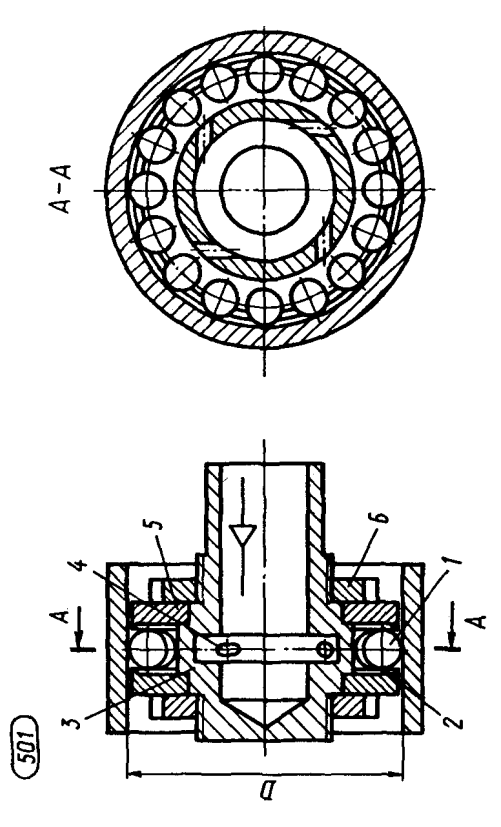
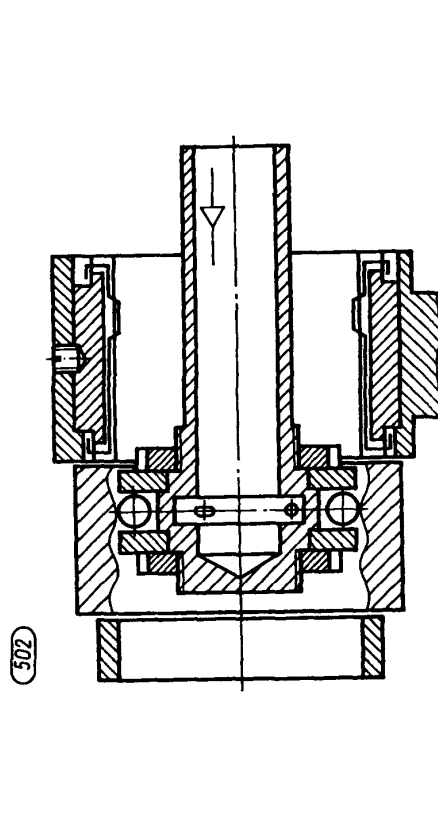
Анализ источников литературы свидетельствует о существовании большого количества конструктивных схем инструментов для обработки внутренних поверхностей вращения [12, 14, 19, 95]. Отсутствие систематизации в этом направлении или ее несовершенство являются проблемой при выборе и разработке необходимого для использования в практике производства накатника. Для ее решения основные разновидности схем пневматических шариковых накатников центробежного действия объединены в группы (таблица 4.1). Для каждой конструктивной схемы инструмента приведены краткая характеристика, отличительные особенности, целевое назначение.

Выбирая конструктивную схему инструмента, предпочтение следует отдавать такой, при которой в процессе обработки в большей степени осуществляется многоосное вращение деформирующих шаров. Это способствует равномерному износу деформирующих шаров, увеличению их долговечности, снижению износа основных рабочих поверхностей инструмента. В зависимости от назначения можно применять деформирующие шары из стали ШХ15, а при обработке труднообрабатываемых малопластичных материалов с высокой твердостью рекомендуется использовать шары из вольфрамокарбида с твердостью материала 89...91 HRA.

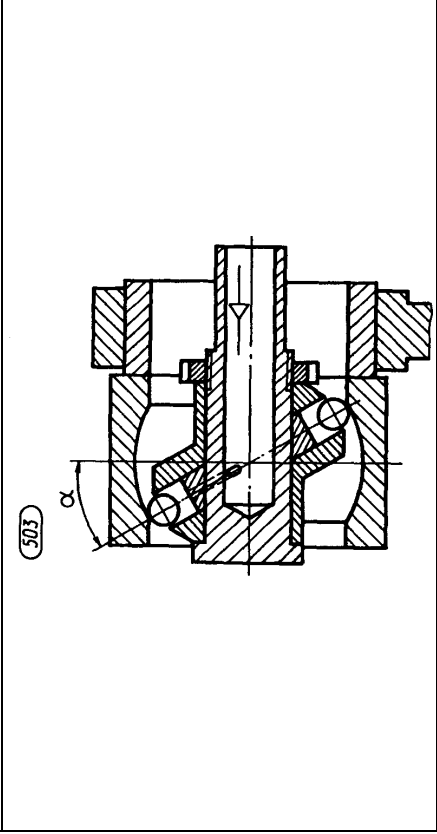
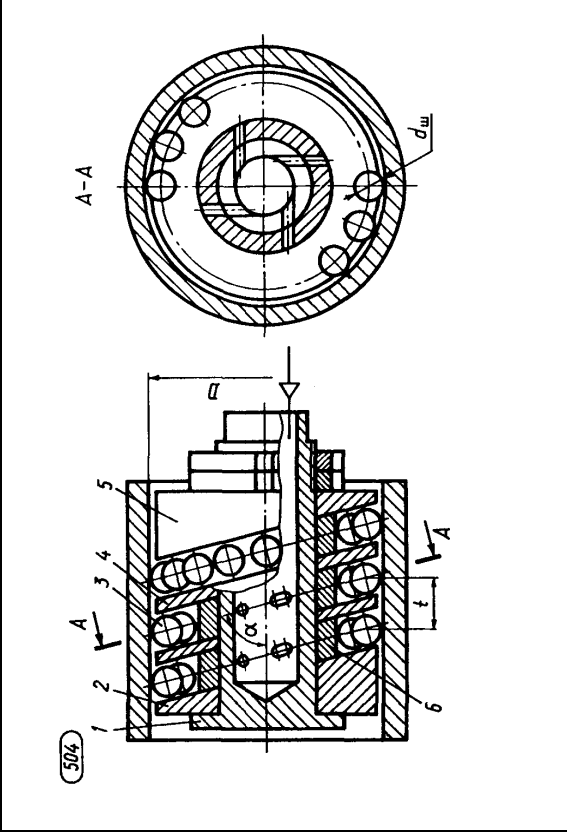
Достоинства инструментов, как показали исследования, заключаются в создании на рабочей поверхности детали тонкодеформированного слоя и малых остаточных напряжений. В процессе обработки снимаются внутренние напряжения, т. е. происходит искусственное старение заготовки. Это способствует получению деталей высокой точности, выполненных из черных и цветных металлов.

Исходными процессами под ПВДО могут быть чистовое, тонкое растачивание, шлифование, хонингование, но без наклепа поверхности. Перед ПВДО шероховатость исходной поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм. Диапазон применяемых подач инструментов при ПВДО – 0,01...3 м/мин, давление рабочей среды (сжатого воздуха, подводимого в осевую полость инструмента) – 0,01...1 МПа. После ПВДО шероховатость поверхности находится в пределах $Ra = 1,63...0,05$ мкм. Меньшие значения Ra характерны для материалов деталей, имеющих среднюю и высокую твердость и меньшую исходную шероховатость. Минимальный диаметр обрабатываемой поверхности составляет 15 мм. Производительность обработки на порядок выше, чем при алмазном выглаживании.

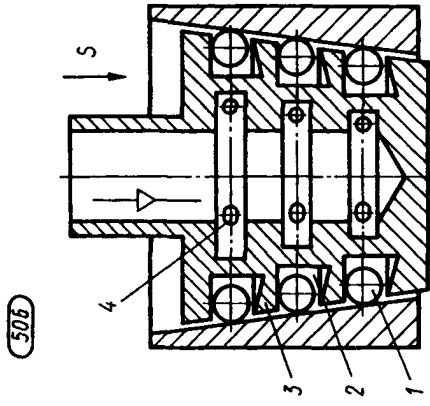
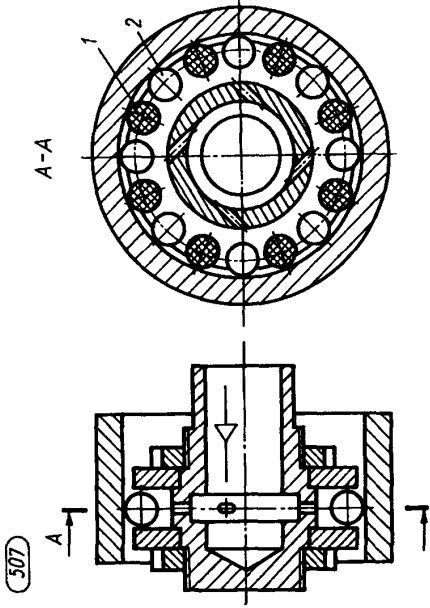
Таблица 4.1 – Основные разновидности инструментов центробежного действия для пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения

1 Конструктивная схема	2 Характеристика, отличительные особенности, назначение инструмента (раскатника)
 <p>501</p>	<p>Оснащен деформирующими шарами 1, свободно расположенными в кольцевой камере расширения 2, корпусом 3 с размещенными на нем дисками 5. Они закреплены на корпусе 3 посредством гаек 6. Привод вращения шаров осуществляется струями сжатого воздуха, направляемыми соплами 4. Минимальный диаметр обрабатываемой поверхности отверстия равен 40 мм [96]</p>
 <p>502</p>	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что имеет возможность свободного перемещения каждого деформирующего шара за наружный диаметр дисков на величину, меньшую, чем половина диаметра шара. Раскатник снабжен технологическими втулками, удерживающими шары от выпадения в нерабочем положении. Предназначен для обработки поверхностей с волнистой образующей [97]</p>

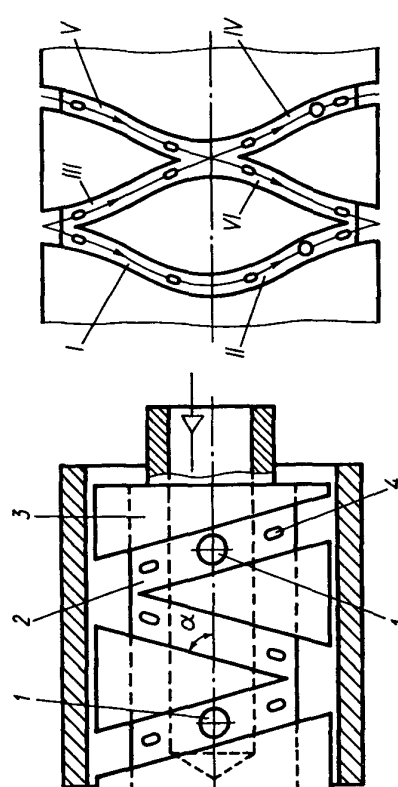
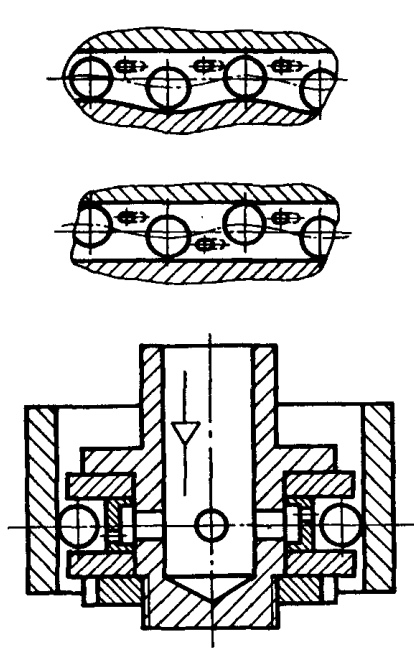
Продолжение таблицы 4.1

1	2
	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] наличием камеры расширения, наклоненной под углом α к продольной оси обрабатываемой поверхности заготовки. В процессе обработки неподвижен. При вращении деформирующих шаров за один оборот заготовки обрабатывается вся сферическая поверхность [98]</p>
	<p>Содержит корпус 1 с расположенными на нем дисками 2, 5 и втулками 6, деформирующие шары 3, разделенные дисками 4. Боковые поверхности камеры расширения составляют с осью раскатника угол, отличающийся от 90°. Камеры расширения выполнены относительно друг друга с соблюдением соотношения</p> $\frac{D - d_{\text{ш}}}{t} = \text{tg } \alpha,$ <p>где t – осевой шаг камер расширения инструмента; α – угол наклона боковой поверхности камеры расширения к оси раскатника. Раскатник обеспечивает обработку поверхности цилиндрического отверстия без осевой подачи. Длину обрабатываемого отверстия L_0 определяют по формуле $L_0 = n \cdot t$ (n – число камер расширения раскатника) [17]</p>

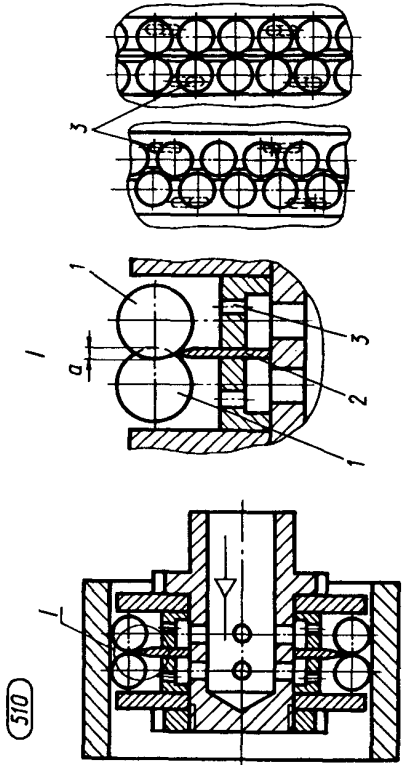
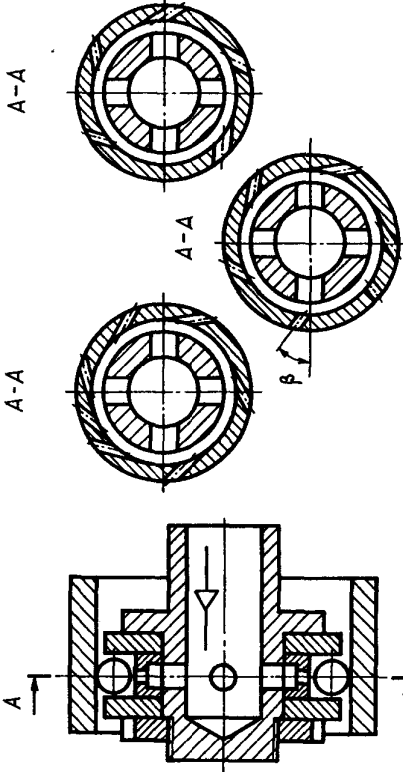
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>(505) Не публикуется</p> 	<p>Предназначен для обработки внутренних кольцевых канавок [87]</p> <p>Оснащен деформирующими шарами 1, размещенными в нескольких расположенных параллельно кольцевых камерах расширения 2. Корпус 3 инструмента выполнен коническим. Каждая камера расширения расположена в перпендикулярных к оси корпуса плоскостях и имеет сопла 4. Применяют для обработки внутренних конических поверхностей [99]</p>
	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] наличием разделительных шаров 1 из антифрикционного материала, размещенных между деформирующими шарами 2. Повышаются стойкость и долговечность деформирующих шаров [100]</p>

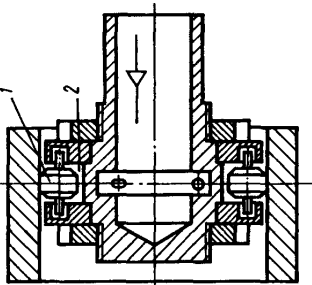
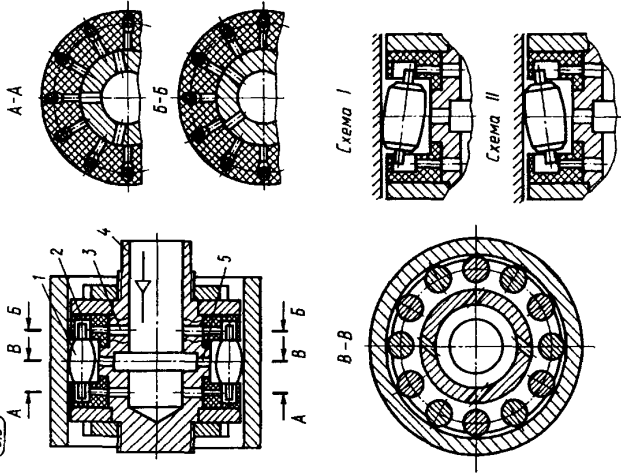
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>508</p> 	<p>Содержит деформирующие шары 1, расположенные в камере расширения 2, выполненной на корпусе 3 по замкнутой винтовой линии правого и левого направлений. На развертке наружной цилиндрической поверхности инструмента линии расположения наклонной камеры расширения и сопел 4 представляют синусоиды. Участки I...IV траектории движения шаров по обрабатываемой поверхности являются на ней отрезками синусоид. Обработка поверхности происходит при вращении заготовки на неподвижном инструменте [101]</p>
<p>509</p> 	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что хотя бы одна из боковых стенок камеры расширения выполнена криволинейно, а отверстия (сопла) смещены относительно друг друга в осевом направлении. Предполагается повышение производительности и качества обработки за счет дополнительных колебаний деформирующих шаров в осевом направлении [102]</p>

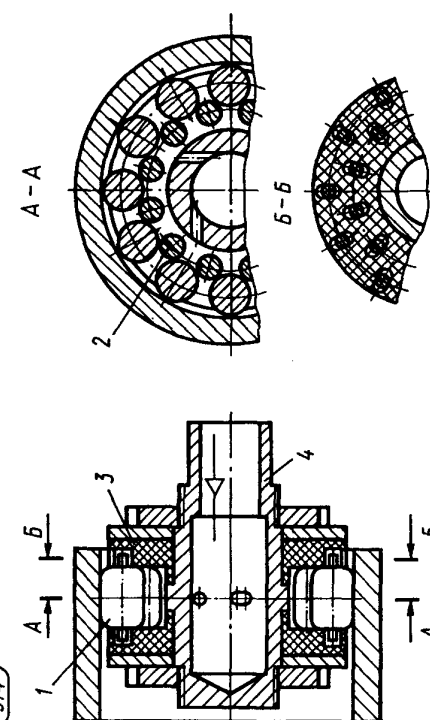
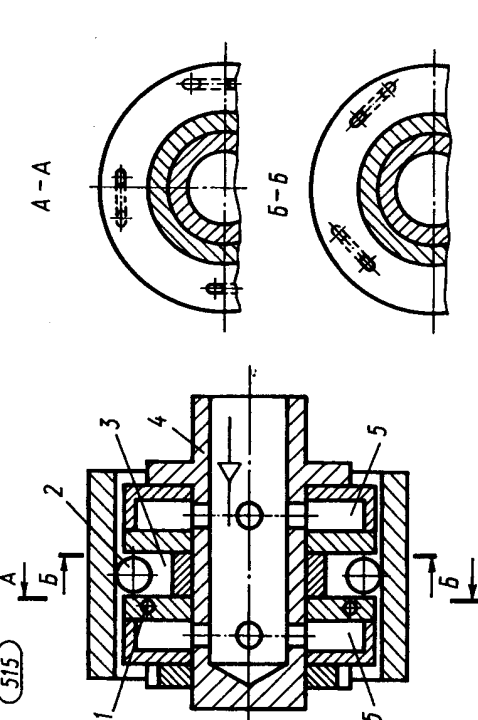
Продолжение таблицы 4.1

1	2
 <p>(570)</p>	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что он выполнен с двумя рядами деформирующих шаров 1. Между ними размещена перегородка 2, имеющая возможность регулирования по высоте. Сопла 3 смещены в осевом направлении от плоскости движения шаров, которые под действием воздушных струй перемещаются к перегородке 2. Шары контактируют с шарами другого кольцевого ряда и совершают дополнительные осевые колебательные движения с амплитудой, определяемой величиной перекрытия a. Предполагается повышение производительности и качества обработки [103]</p>
 <p>(571)</p>	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что расположенные в плоскости, перпендикулярной оси инструмента, сопла для подачи сжатого воздуха в камеру расширения к деформирующим шарам выполнены с переменным в окружном направлении шагом, с разными диаметрами, с переменным от радиального направления углом β, с углом наклона в пределах $0 < \beta < 90^\circ$. Предполагается повышение качества обработки [104]</p>

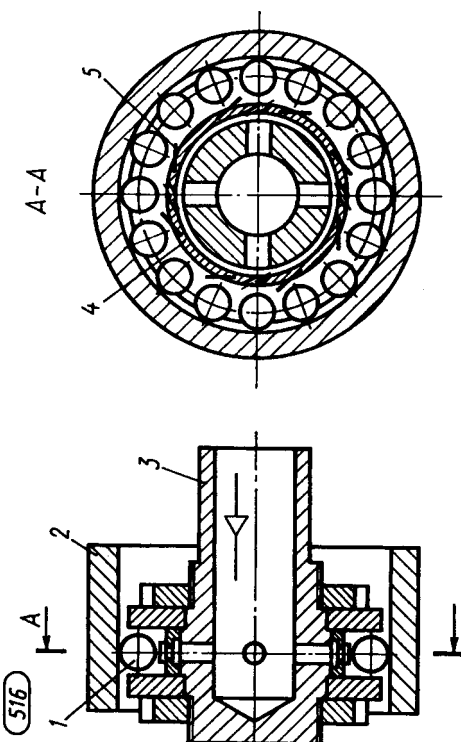
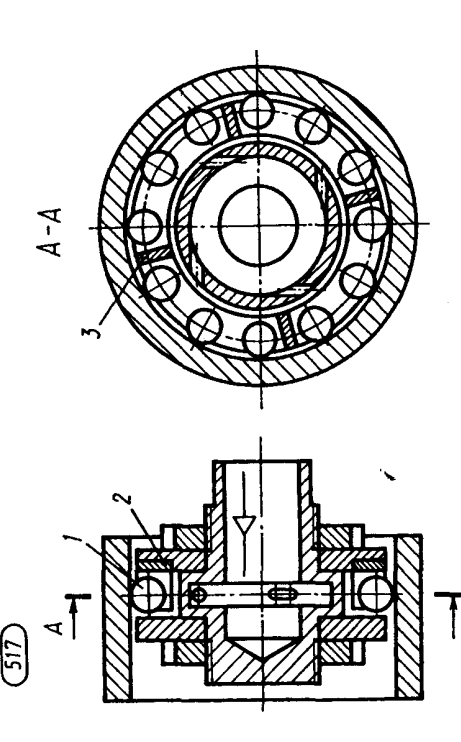
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>512</p> 	<p>Содержит деформирующие элементы 1, ролики с опорными цапфами. На боковых поверхностях дисков, образующих стенки кольцевой камеры расширения 2, выполнены кольцевые канавки под цапфы роликов, установленных в них с зазором. Раскатники применяются для повышения производительности процесса обработки [105]</p>
<p>513</p> 	<p>Оснащен деформирующими роликами 1, на торцах которых выполнены цапфы. Кольца 2 имеют радиально расположенные каналы, которые служат для подвода сжатого воздуха под цапфы роликов, имеющих возможность поворота в корпусе 4. В последнем выполнены сопла 5 для подвода сжатого воздуха к роликам 1. Ролики совместно с кольцами 2 совершают вращательное и качательное движение. Это обеспечивается за счет двух рядов каналов 3, смещенных относительно друг друга в угловом направлении (разрезы А-А, Б-Б). Благодаря качательному движению роликов (схемы I и II) происходит периодическое смещение пятна контакта от одного торца ролика к другому. Интенсифицируется процесс обработки [106]</p>

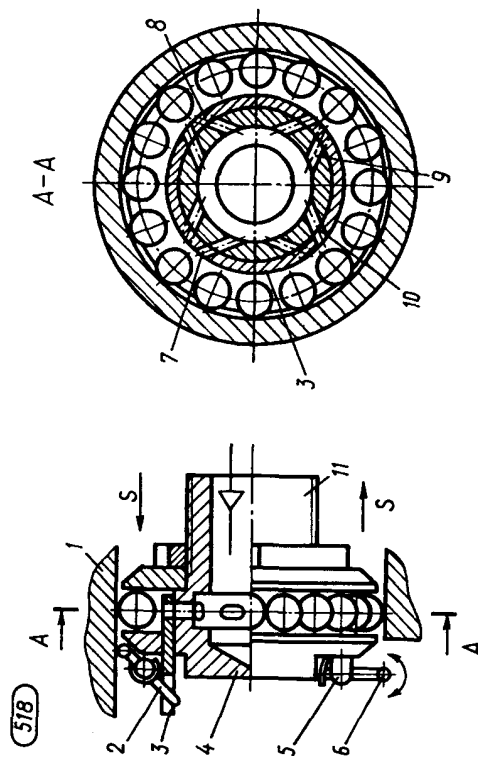
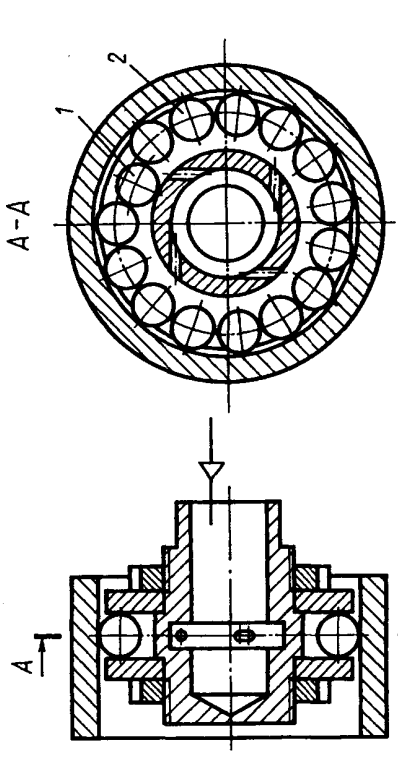
Продолжение таблицы 4.1

2	1
<p>Отличается от инструмента (поз. 512) [105] тем, что он снабжен, кроме деформирующих роликов 1, опорными роликами 2 с цапфами, размещенными в радиальных пазах боковых стенок камеры расширения. Они образуют диски 3, установленными на корпусе 4, и имеют возможность совместного вращения с деформирующими и опорными роликами. Предполагается уменьшение потерь сжатого воздуха за счет увеличения парусности роликов 1, 2, что способствует возрастанию воздействия центробежной силы на обрабатываемую поверхность, т. к. происходит дополнительное давление опорных роликов на деформируемые [107]</p>	
<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что сопла 1 выполнены в боковых стенках дисков 3, установленных на корпусе 4. Внутренние полости 5 дисков 3 – форкамеры соединены радиальными каналами с осевым отверстием корпуса 4, служащим для подвода сжатого воздуха в камеру расширения с расположенными в ней деформирующими шарами 2. Расположение сопел в дисках показано на разрезах А-А и Б-Б. В инструменте обеспечивается многоосное вращение шаров, интенсифицируется процесс обработки и повышается ее производительность [14]</p>	

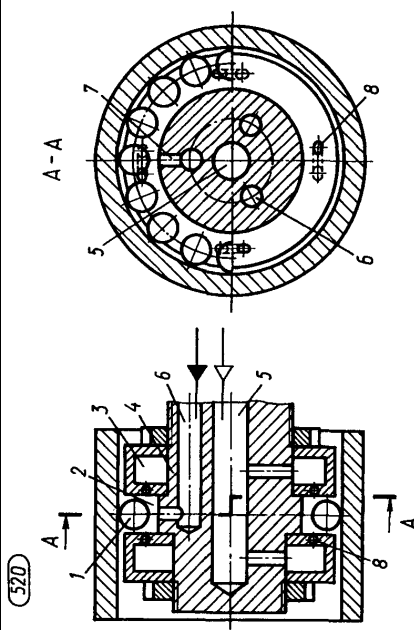
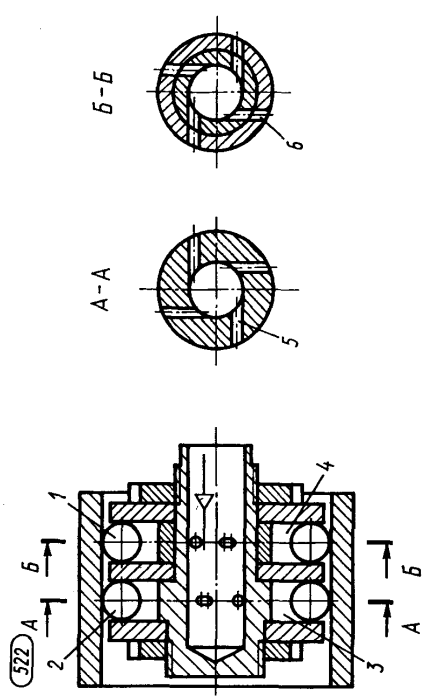
Продолжение таблицы 4.1

2	1
<p>Содержит деформирующие шары 1, камеру расширения, корпус 3, на котором установлено кольцо 4, имеющее возможность вращения под действием реактивной силы струй сжатого воздуха, направляемых соплами этого кольца. Наружная поверхность кольца 4 снабжена лепестками 5, сообщающими при его вращении дополнительную кинетическую энергию деформирующим шарам [108]</p>	
<p>Снабжен деформирующими шарами 1 и крыльчаткой 2, выполненной в виде кольца с торцовыми лопастями 3. Крыльчатка 2, имеющая возможность вращения, установлена в камере расширения. В процессе обработки сжатый воздух воздействует одновременно на шары 1 и лопасти крыльчатки 2, повышая КПД инструмента [109]</p>	

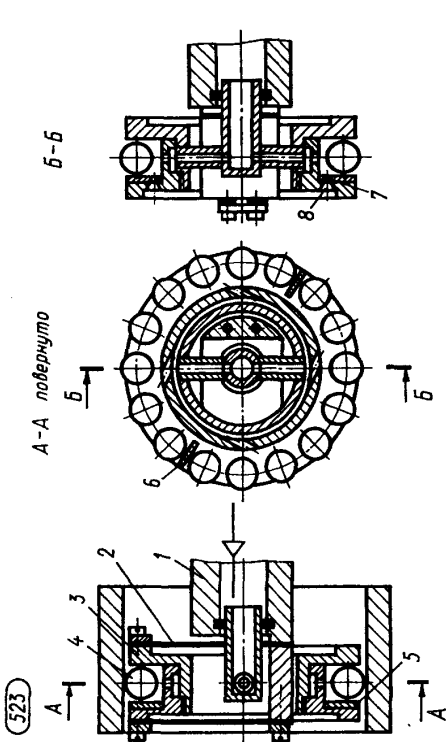
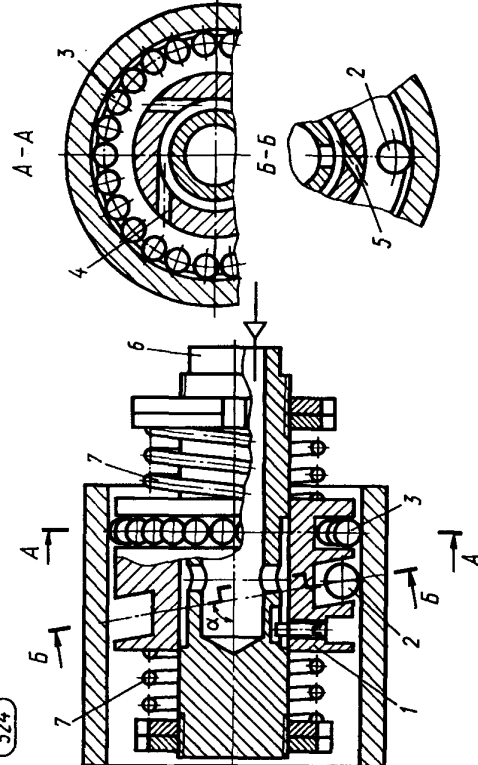
Продолжение таблицы 4.1

1	2
 <p>518</p>	<p>Содержит деформирующие шары, механизм обратного хода, выполненный в виде охватывающего корпус 11 кольца 3 с пазами, установленный на корпусе, имеющий возможность углового поворота подпружиненных рычагов 2, на одном конце которых установлены имеющие возможность вращения ролики 6. Противоположные концы рычагов взаимодействуют с пазами кольца 3, направленными в разные стороны соплами 7, 8. Рычаги 2 установлены на оси и подпружинены пружинами 5. В корпусе выполнены направленные в разные стороны сопла 9, 10. При перемещении инструмента влево по подаче рычаги 2 с роликами 6 наклонены к шарам. Оси сопел 7, 10 совмещены, а при обратном ходе происходит поворот рычагов, перемещение кольца 3 вправо по подаче и совмещение осей сопел 8, 9 [110]</p>
 <p>519</p>	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что содержит промежуточный шар 1 и деформирующие шары 2. В процессе обработки создается незначительное заклинивание деформирующих шаров 2. Диаметры шаров 1, 2 одинаковы. При их вращении происходит эффект выглаживающего раскатывания поверхности [88]</p>

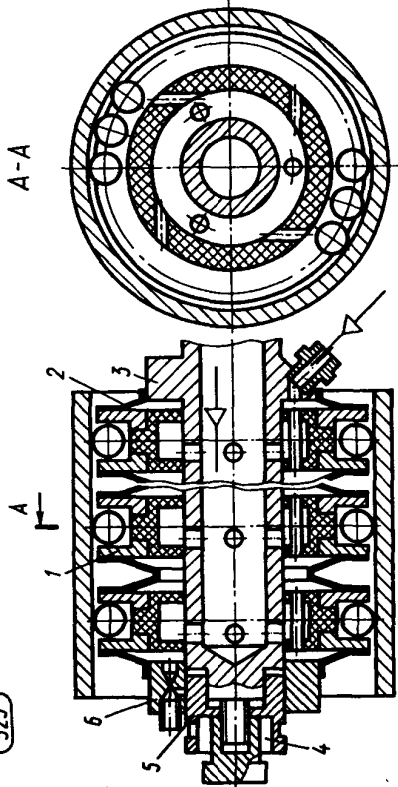
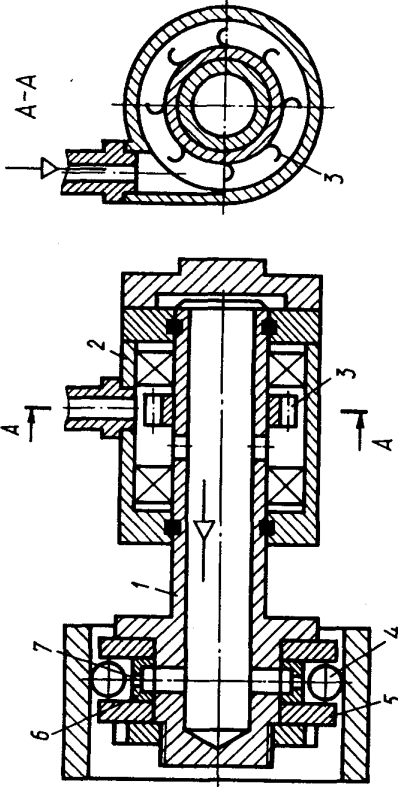
Продолжение таблицы 4.1

<p style="text-align: center;">1</p>  <p style="text-align: center;">520</p>	<p style="text-align: center;">2</p> <p>Содержит деформирующие шары 1, камеру расширения 2, образующую стенками двух форкамер 3 и наружной цилиндрической поверхностью корпуса 4. В нем расположены основной 5 и дополнительный 6 каналы. По основному каналу в сопла 8 подается сжатый воздух, а по каналам 6, 7 можно подавать, например, машинное масло. Создаются условия воздействия комбинированной рабочей среды на каждый шар [111]</p>
<p style="text-align: center;">Не публикуется</p> <p style="text-align: center;">521</p>	<p>При обработке инструментом поверхности заготовки создаются условия для реализации эффекта избирательного переноса в паре трения [112]</p>
 <p style="text-align: center;">522</p>	<p>Снабжен двумя рядами деформирующих шаров 1, 2, каждый из которых размещен в камере расширения 3, 4. Деформирующие шары 1 выполнены с меньшим диаметром из материала, имеющего больший удельный вес. Направление сопел 5 первой камеры расширения противоположно направлению сопел 6 второй камеры расширения. Инструмент обеспечивает образование на поверхности макрорельефа ромбической формы [113]</p>

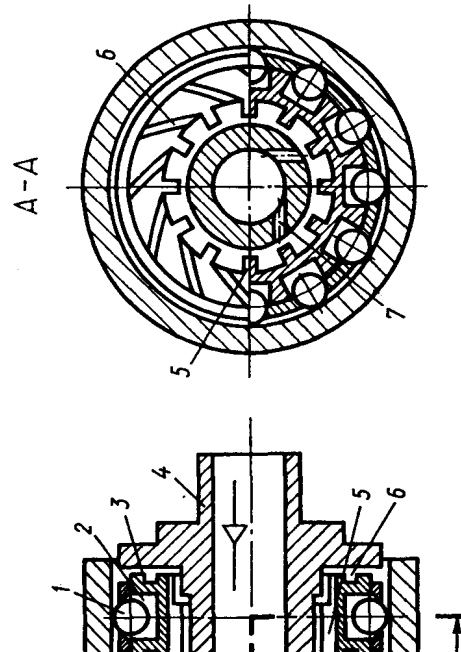
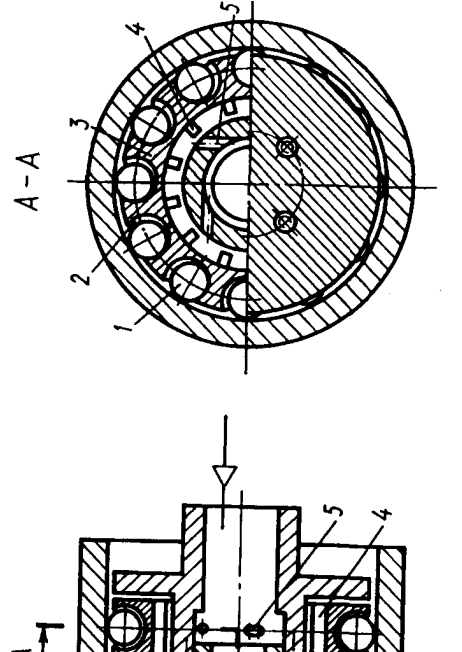
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p>(523)</p> 	<p>Оправка инструмента снабжена корпусом 1 и соединена упругими элементами (плоскими пружинами) 2 с раскатником 3, имеющим деформирующие шары 4 и камеру расширения, в которой расположено кольцо 5. Оно имеет на торце пластины 6 для передачи вращения от шаров 4. В кольцо 5 на его торце выполнены окна 7, которые периодически соединяются при его вращении с боковыми соплами 8. Сжатый воздух выходит в атмосферу и создает на соплах 8 реактивную силу, перемещающую раскатник вправо; влево раскатник перемещается пружинами. Создается автоколебательный режим движений раскатника с шарами. Получается своеобразная топография поверхности [85]</p>
<p>(524)</p> 	<p>Содержит корпус 1, шар 2 (возбудитель осевых колебаний), деформирующие шары 3, сопла 4, 5, оправку 6, пружину 7 и другие элементы. Корпус 1 установлен на оправке, имея возможность возвратно-поступательного перемещения. Сжатый воздух при подаче в осевой канал оправки 6 поступает одновременно в сопла 4 к шарам 3, а также в сопла 5 к шару 2. Шар 2 создает в двух крайних положениях движения максимальную осевую силу, являющуюся частью составляющей центробежной силы. Векторы этих осевых сил в крайних положениях шара 2 разные по направлению, но одинаковые по модулю. Это позволяет корпусу 1 осуществлять осциллирующие перемещения совместно с шарами 2, 3. Результат – вибораскатывание поверхности с образованием новой топографии [86]</p>

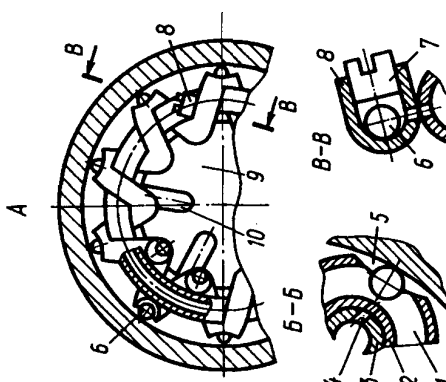
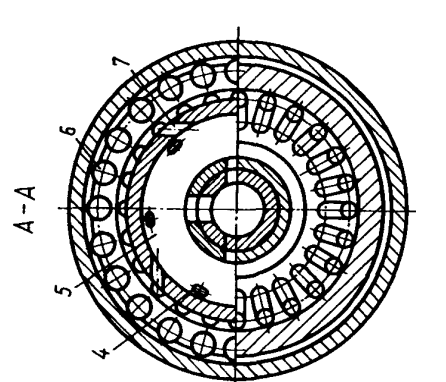
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p data-bbox="839 1962 863 2018">525</p> 	<p data-bbox="344 203 783 1211">Отличается от инструмента [96] тем, что состоит из отдельных блоков (раскатников) 1, каждый из которых имеет мембрану 2, соединенную с одной стороны (справа) с оправкой 3, а с другой (слева) – с подвижной втулкой 6, расположенной на поршне 5. Блоки раскатников соединены каналом для подвода сжатого воздуха от источника питания. По другому каналу сжатый воздух подается в осевую полость оправки и далее к деформирующему шарам. При подводе его в полость между мембранами происходит их перемещение совместно с раскатниками влево, пока перемещающаяся втулка не соединится своими каналами с каналами 4 поршня 5 и далее с атмосферой. Происходит обратное перемещение раскатников. Интенсифицируется процесс обработки [114]</p>
<p data-bbox="839 1962 863 2018">526</p> 	<p data-bbox="839 203 1158 1211">Содержит оправку 1 с закрепленными на ней лопатками 3, деформирующие шары 4, размещенные в камере расширения между дисками 5, кольцо 6 с соплами 7, выполненными в виде спиральных каналов. Оправка, имеющая возможность вращения вокруг собственной оси, смонтирована в корпусе 2. Сжатый воздух подводится к лопаткам 3 и далее по осевому каналу оправки 1 к деформирующим шарам 4. Диски 5 получают вращение вместе с шарами 4. Уменьшается износ дисков и шаров. Повышается качество поверхности [115]</p>

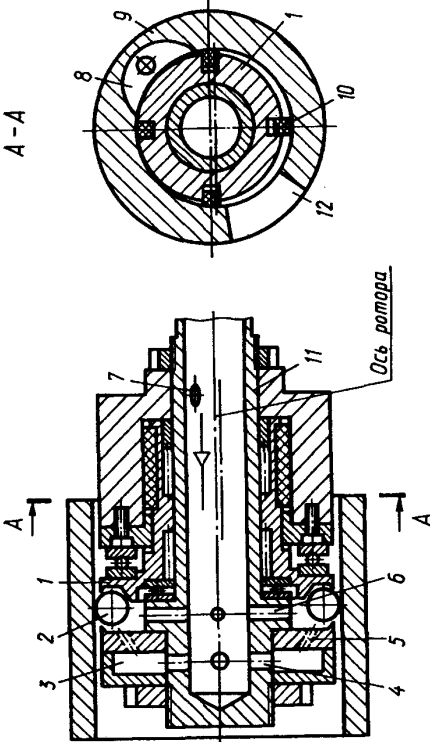
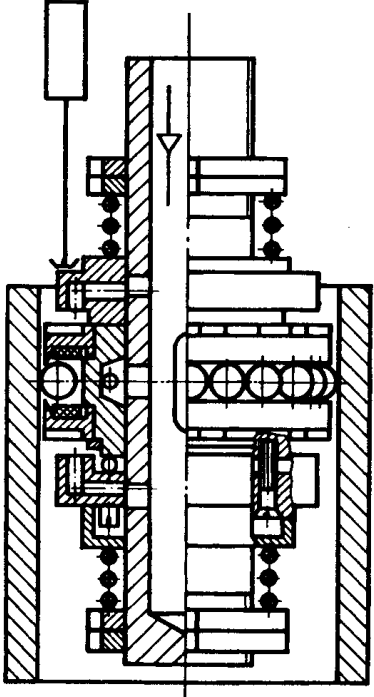
Продолжение таблицы 4.1

2	1
<p>Снабжен деформирующими шарами 1, размещенными в полости 2 кольца 3, установленного в корпусе 4 и имеющего возможность вращения. На внутренней поверхности кольца 3 выполнены лопатки 5, а на торцевых поверхностях с обеих сторон – спиральные каналы 6, направление которых противоположно направлению сопел 7. Увеличению частоты вращения шаров 1 способствуют воздействие сжатого воздуха на лопатки 5 кольца 3 и реактивный момент, возникающий при выходе отработавшей среды в атмосферу через спиральные каналы 6. Интенсифицируется процесс обработки [116]</p>	
<p>Содержит деформирующие шары 1, установленные в гнездах 2. Возможно выполнение осевого и радиального перемещений в процессе обработки. Вращение шаров 1 с кольцом 3 происходит под воздействием струй сжатого воздуха, истекающего из сопел 5 на лопатки 4. Интенсифицируется процесс обработки [117]</p>	

Продолжение таблицы 4.1

2	1
<p>Снабжен камерой расширения 1, являющейся проходным отверстием трубки 2, спирально навитой на корпус 3, выполненный в виде пустотелого тора. В каждом витке трубки выполнено отверстие 5, предназначенное для контакта деформирующих шаров 6 с обрабатываемой поверхностью заготовки. Для загрузки шаров в камеру расширения предусмотрена бобышка 8 с пробкой 7, приваренная к трубке 2. Корпус 3 пустотелого тора соединен трубками 10 с полостью оправки 9. Для воздействия струй сжатого воздуха на шары 6 и придания им движения в трубке 2 предусмотрены сопла 4. Предполагается увеличение глубины наклепа в поверхностном слое металла обрабатываемой заготовки [118]</p>	
<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что он снабжен дисками 1, установленными на оправке 3 и оснащенными лопатками 2. Каждый диск имеет возможность вращения как по часовой стрелке, так и против нее. Вращение обеспечивается воздействием сжатого воздуха, направляемого соплами 4 в стенках форкамеры 5. Деформирующие шары 6 вращаются под воздействием струй сжатого воздуха, направляемых соплами 7, выполненными в форкамере 5 в плоскости вращения шаров. Это создает условия для многоосного вращения шаров и увеличения частоты их вращения. Уменьшается износ шаров и дисков, повышается производительность процесса обработки [119]</p>	

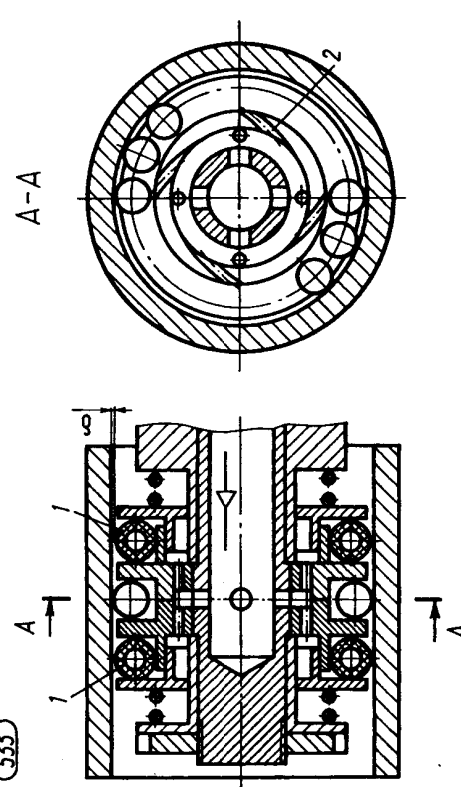
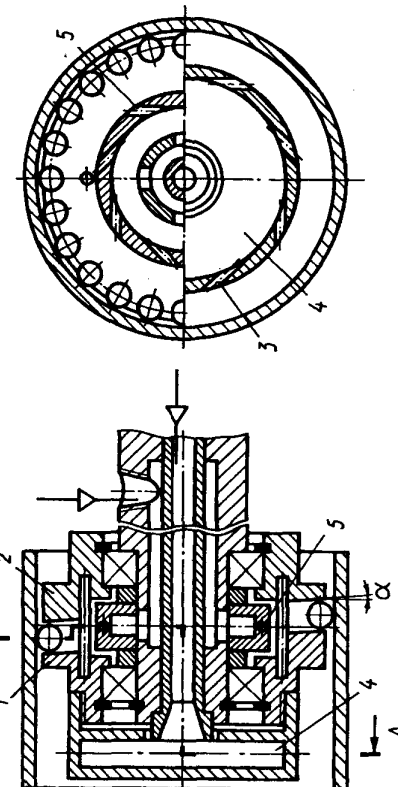
Продолжение таблицы 4.1

1	2
<p data-bbox="869 1937 901 1993">531</p>  <p data-bbox="726 1534 758 1646">Ось ротора</p>	<p data-bbox="869 1937 901 1993">532</p> 
<p data-bbox="327 1948 359 2004">531</p>	<p data-bbox="327 1948 359 2004">532</p>

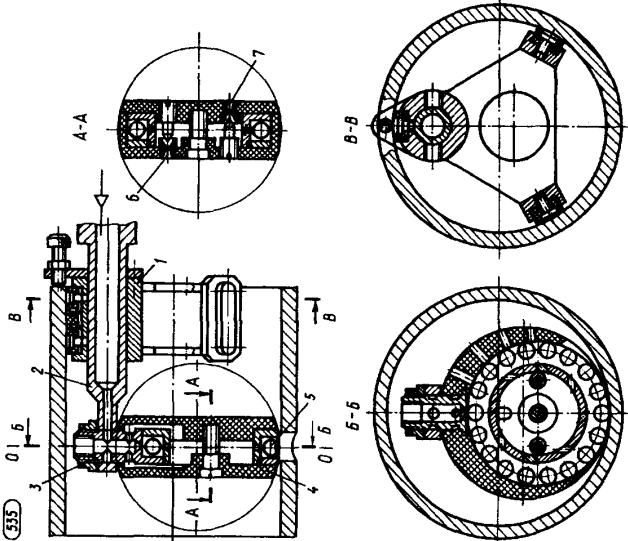
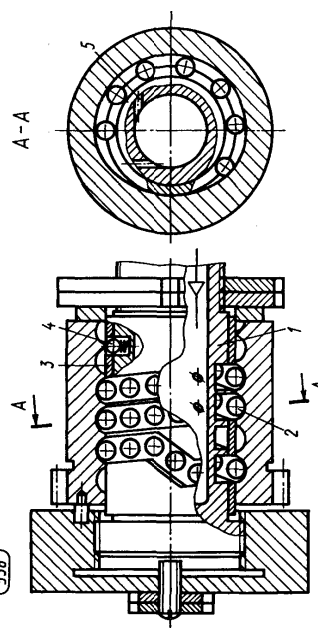
Отличие раскатника от инструмента (поз. 530) [119] состоит в том, что в нем установлен ротор 1, торец которого образует стенку камеры расширения. Ротор, оснащенный лопатками 10, имеет возможность вращения относительно своей оси, не совпадающей с осью оправки 9. Вращение ротора 1 осуществляется сжатым воздухом, подводимым по осевому каналу корпуса 11, по каналам 7, 8. Сжатый воздух воздействует на лопатки 10, а затем по каналу 12 уходит в атмосферу. С другой стороны, от общей магистрали сжатый воздух направляется в радиальные каналы 6, каналы 4, форкамеру 3 и далее в сопла 5, приводя во вращение деформирующие шары 2. Конструкция торца ротора 1 исключает осциллирующие перемещения шаров в процессе обработки, что уменьшает волнистость поверхности после обработки [120]

Снабжен золотниковой системой, позволяющей синхронизировать в определенных пределах частоту вращения деформирующих шаров и дисков. Расширяются технологические возможности инструмента [121]

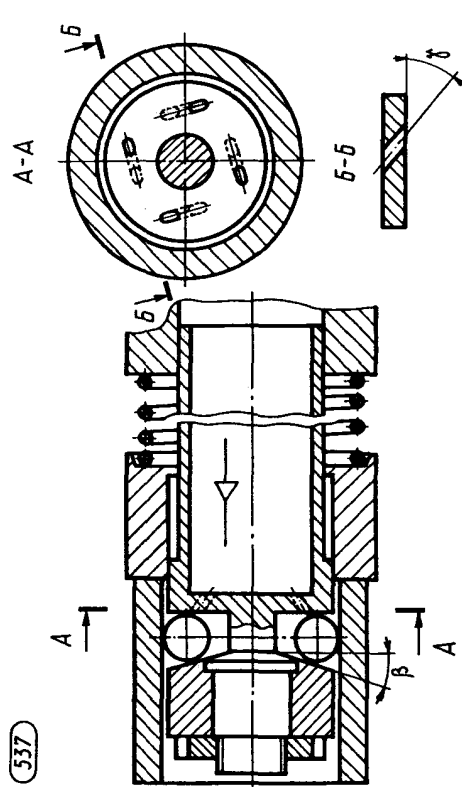
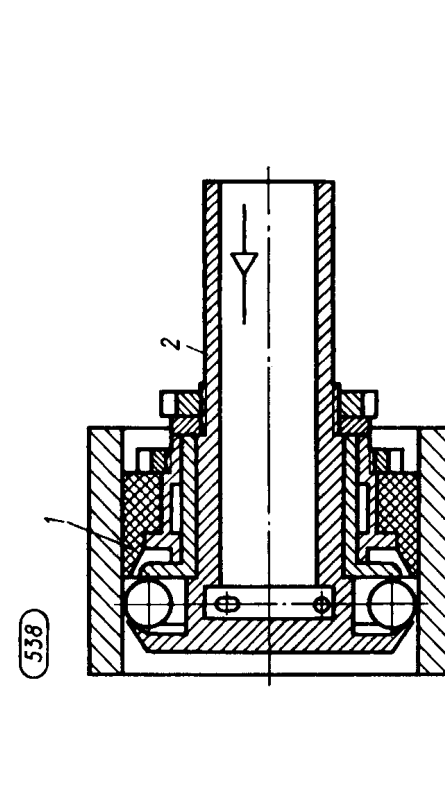
Продолжение таблицы 4.1

<p>533</p> 	<p>2</p> <p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что снабжен баллончиками 1, позволяющими регулировать величину зазора между их наружной поверхностью и диаметром обрабатываемого отверстия в зависимости от изменения давления сжатого воздуха в камере расширения. Снабжен спиральными соплами 2. Возможно адаптивное управление процессом, например, при обработке поверхностей с волнистой образующей, поверхностей с различными диаметрами обработки [122]</p>
<p>534</p> 	<p>Отличие от инструмента (поз. 503) [98] состоит в том, что раскатчик имеет диски 1, 2, имеющие возможность вращения под действием сжатого воздуха, выходящего из сопел 3, выполненных в форкамере 4. Деформирующие шары приводят во вращение сжатый воздух, поступающий в сопла 5. Обеспечивается регулирование частоты осциллирующего движения деформирующих элементов вдоль оси обрабатываемого отверстия, многоосность вращения деформирующих элементов, повышение стойкости к изнашиванию стенок камеры расширения. Технологические возможности раскатника по управлению топографией поверхности расширяются [123]</p>

Продолжение таблицы 4.1

1	2
	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что выполнен с механизмом центрирования 1, установленным в обрабатываемом цилиндре с оправкой 2, снабженной муфтой 3 и соединенной с раскатником 4, имеющим возможность вращения относительно оси 0–0, совпадающей с осью отверстия, полученного в заготовке. Сжатый воздух подается в камеру расширения к деформирующим шарам 5 и соплам 6, 7, создающим воздушными струями реактивную силу. Это обеспечивает вращение раскатника относительно оси 0–0 и обработку кромки на стыке двух цилиндрических поверхностей [125]</p>
	<p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что имеет корпус 1 с деформирующими шарами 2, отделяемыми в нерабочем положении раскатника от заготовки втулкой 3, имеющей возможность осевого перемещения. Раскатник снабжен фиксирующим механизмом 4. При подводе сжатого воздуха по соплам 5 к деформирующим шарам последние перемещаются по винтовому замкнутому каналу, обеспечивая обработку винтовых канавок на внутренней поверхности заготовок типа гаек, винтовых механизмов качения и др. [125]</p>

Окончание таблицы 4.1

2	
<p>Отличие раскатника от инструмента (поз. 501) [96] состоит в том, что сопла выполнены в торцевой стенке полой трубы, которая служит для подвода сжатого воздуха к деформирующим шарам, расположенным в камере расширения. Минимальный диаметр обрабатываемой поверхности отверстия 15 мм [126]</p>	
<p>Накатник отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что снабжен кольцевым уплотнителем 1, имеющим возможность вращения относительно корпуса 2. При соответствующей конструкции шумопоглощающего устройства обеспечивается защита от звука со стороны выхода отработавшей рабочей среды [127]</p>	

4.6 Класс схем инструментов импульсно-ударного действия для обработки внутренних цилиндрических поверхностей

Тот или иной инструмент для обработки поверхности заготовки (таблица 4.2) позволяет создать большую маслостойкость поверхности по сравнению с инструментами, рассмотренными в таблице 4.1, получить при обработке поверхности большую глубину наклепа, в зависимости от технических требований чертежа детали образовать топографию поверхности с нерегулярным или регулярным микрорельефом, снять внутренние напряжения в детали или заготовке, обеспечить отделочно-упрочняющую обработку (поз. 605). Возможна комбинированная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей (поз. 605, 606, 609).

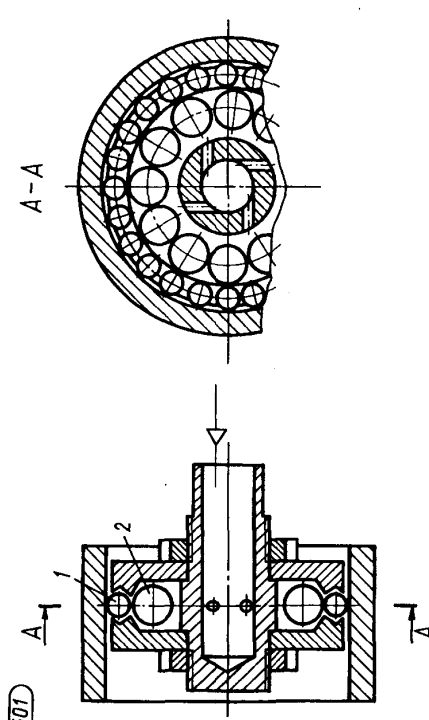
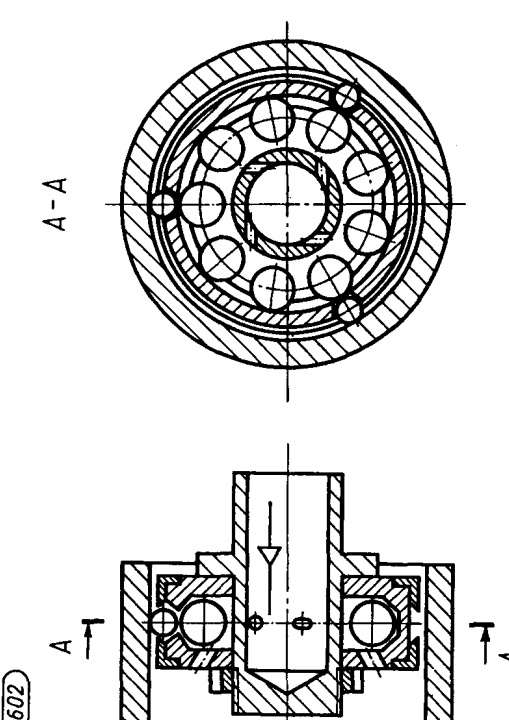
Большими технологическими возможностями обладают способ получения регулируемого микрорельефа и инструменты, созданные на его основе [37]. Перед ПВДО проводится чистовое или тонкое растачивание, шлифование, хонингование внутренней цилиндрической поверхности заготовки. Обрабатываемые материалы – стали различных марок, чугуны и цветные металлы.

При образовании нового микрорельефа инструментом (поз. 601) на рабочих поверхностях стальных заготовок производительность повышается по сравнению с виброобкатыванием в 2 раза, а при обработке чугуна – в 1,2 раза [14].

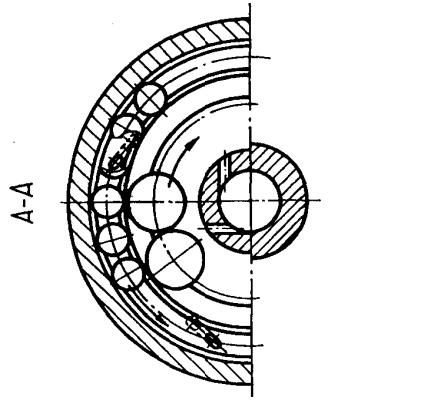
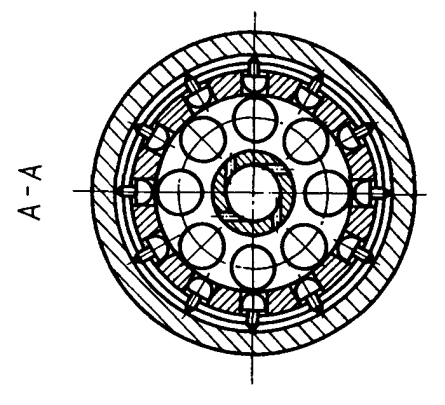
4.7 Класс конструктивных схем инструментов для отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения

Технологические возможности накатников для ПВДО заготовок валов из конструкционных сталей, чугунов и цветных металлов с обеспечением шероховатости поверхности нежестких деталей $Ra \leq 0,32$ мкм представлены в таблице 4.3. Однако этот параметр можно существенно улучшить, если исходная шероховатость поверхности $Ra \leq 1,25$ мкм. В зависимости от конструктивных параметров инструмента и режимов процесса ПВДО можно получить топографию поверхности с более (менее) выраженными сферическими отпечатками (гладкую поверхность). Нельзя считать, что такие качественные характеристики обработанной поверхности свидетельствуют о несовершенстве технологии, наоборот, в этом проявляется преимущество процесса ПВДО, когда в зависимости от эксплуатационных условий, в которых находится деталь, создают необходимую топографию и микрорельеф ее рабочей поверхности [128–130].

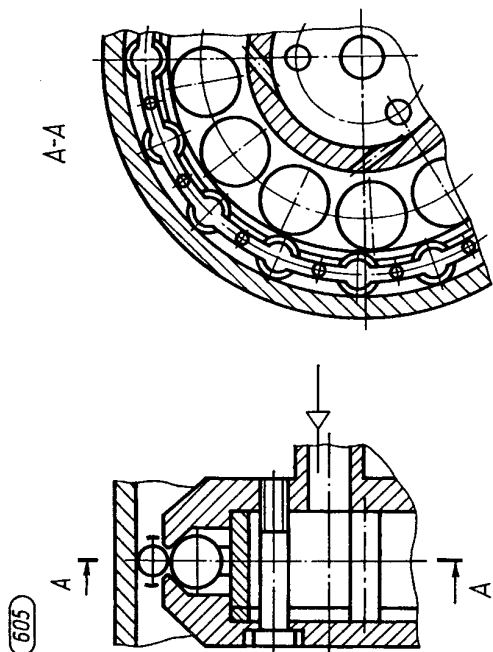
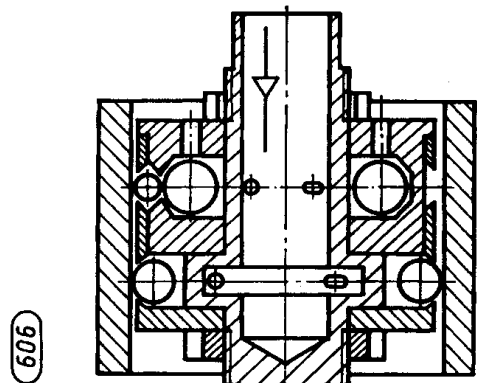
Таблица 4.2 – Основные разновидности инструментов импульсно-ударного действия для пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения

1 Конструктивная схема	2 Характеристика, отличительные особенности, назначение инструмента (раскатника)
 <p>601</p>	<p>Содержит деформирующие 1 и расположенные concentрично с ними приводящие шары 2, размещенные в кольцевых камерах расширения. Обеспечивается упрочняющая обработка внутренних цилиндрических поверхностей с образованием нерегулярного микрорельефа, а также искусственное старение деталей и заготовок [14]</p>
 <p>602</p>	<p>Отличается от инструмента (поз. 601) [14] тем, что деформирующие шары размещены в локальных гнездах. Обеспечивается упрочняющая обработка внутренних цилиндрических поверхностей с образованием нерегулярного, а при отсутствии вращения заготовки – регулярного микрорельефа, а также искусственное старение деталей и заготовок [131]</p>

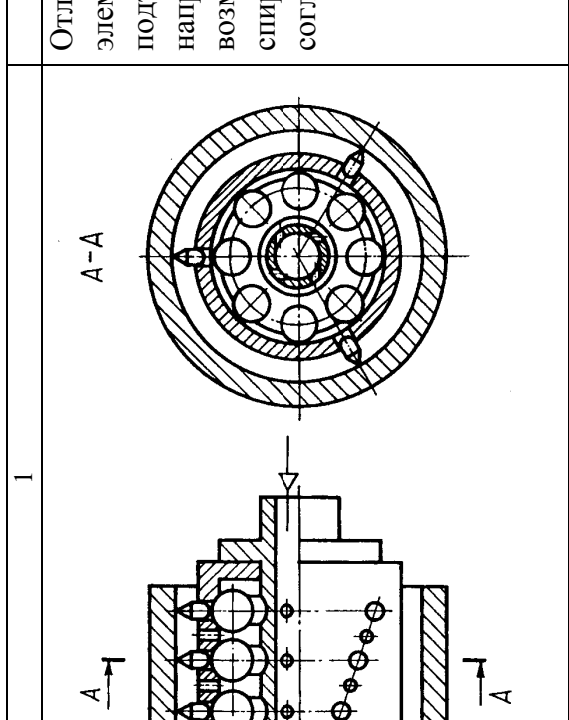
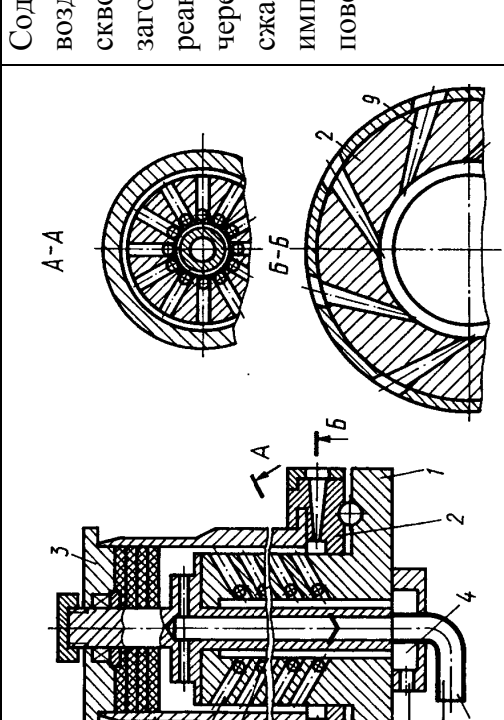
Продолжение таблицы 4.2

2	1
<p>Отличается от инструмента (поз. 601) [14] тем, что каждый кольцевой ряд деформирующих и приводящих шаров имеет автономный привод вращения. Сопла, предназначенные для одного и второго кольцевых рядов шаров, в каждой из камер расширения имеют противоуположные направления. Повышается производительность процесса обработки [132]</p>	
<p>Отличается от инструмента (поз. 602) [131] тем, что в качестве деформирующих элементов применены инденторы, у которых рабочая часть может быть, например, конической, а также любой другой формы, в зависимости от конкретного рисунка макрорельефа обрабатываемой поверхности детали, задаваемой чертежом. Так же, как и для поз. 602, обеспечивается получение регулярного и нерегулярного микрорельефов [14]</p>	

Продолжение таблицы 4.2

1	2
	<p>Отличается от инструмента (поз. 601) [14] тем, что на торцах дисков внешней кольцевой канавки выполнены конические опорные поверхности для деформирующих шаров, заключенных в сепараторе. Обеспечивается размерно-чистовая отделочно-упрочняющая обработка (при отсутствии подачи к шарам сжатого воздуха), размерно-чистовое раскатывание поверхности лунок на любых ее участках, размерно-чистовое раскатывание поверхности лунок на любых ее участках, раскатывание поверхности лунок на любых ее участках, размерно-чистовое раскатывание поверхности лунок на любых ее участках, размерно-чистовое раскатывание поверхности лунок на любых ее участках. Это достигается при соответствующей конструкции инструмента [133]</p>
	<p>Отличается от инструмента (поз. 601) [14] тем, что он снабжен дополнительным автономным кольцевым рядом деформирующих шаров, принцип его работы аналогичен принципу работы раскатки центробежного действия. Предназначен для комбинированной отделочно-упрочняющей обработки [222]</p>

Продолжение таблицы 4.2

1	2
<p>507</p> 	<p>Отличается от инструмента (поз. 602) [131] тем, что деформирующие элементы в сепараторе расположены по винтовой линии, имеющей угол подъема и направление винта, соответствующие углу подъема и направлению обрабатываемой спиральной канавки. Сепаратор имеет возможность вращения вокруг своей оси. Предназначен для обработки спиральных резьбовых канавок. При этом частота вращения заготовки согласуется с величиной осевой подачи инструмента [134]</p>
<p>508</p> 	<p>Содержит корпус 1, опорную подшипниковую обойму 2, крышку 3, воздуховоды 4, 5, деформирующие шары 6. Корпус 1 имеет систему сквозных радиальных каналов 7. Обойма 2 может вращаться вместе с заготовкой (гильзой) 8 вокруг своей оси. Вращение обеспечивает реактивная сила, возникающая при выходе сжатого воздуха в атмосферу через сопла 9, выполненные в обойме 2. При поочередной подаче сжатого воздуха в пульсирующем режиме в воздуховоды 4, 5 происходит импульсно-ударная отделочно-упрочняющая обработка рабочей поверхности вращающейся гильзы 8 [135]</p>

Окончание таблицы 4.2

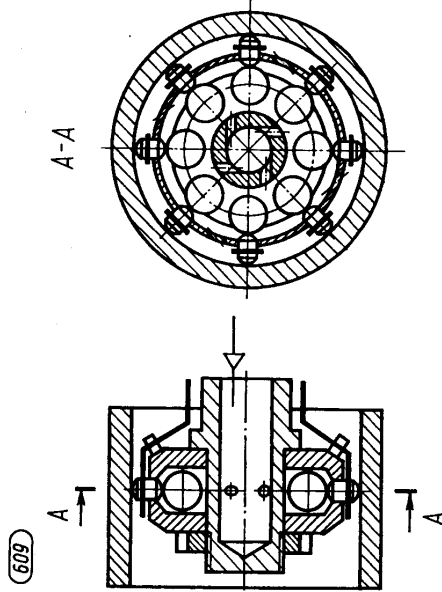
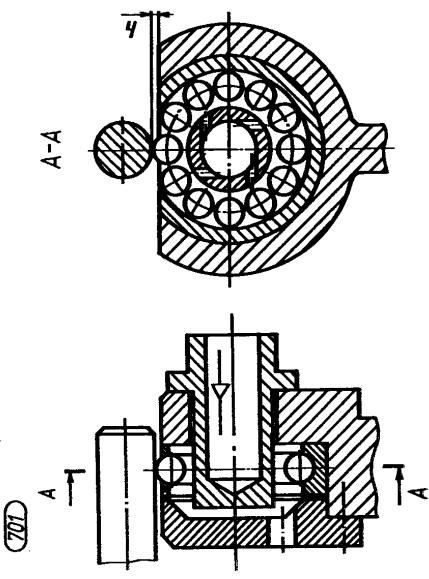
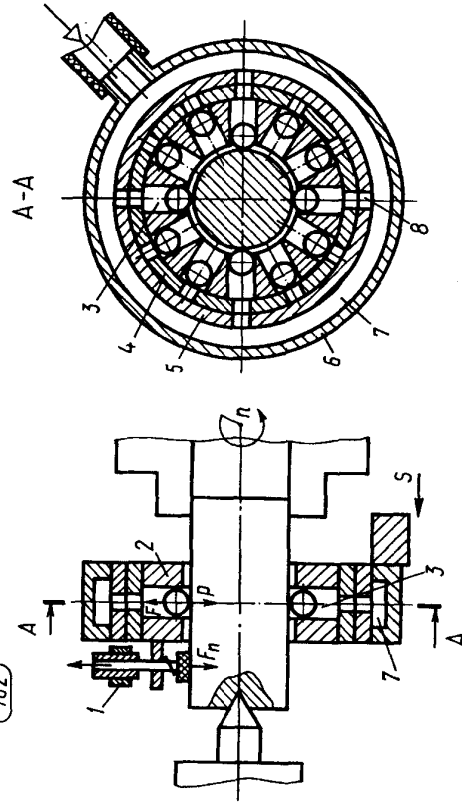
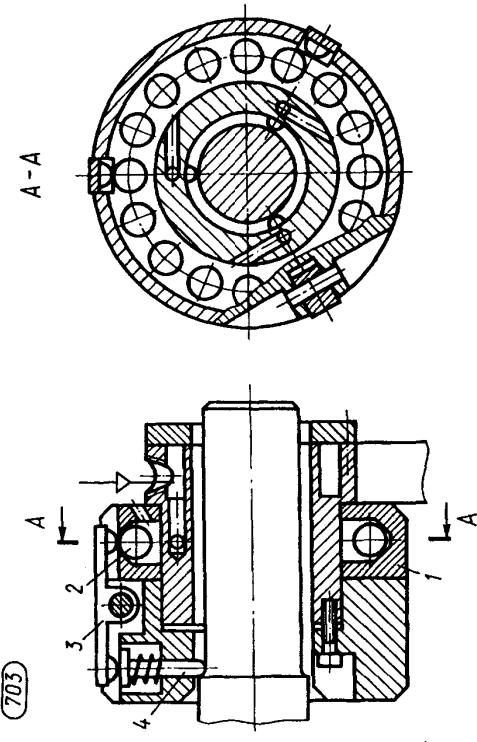
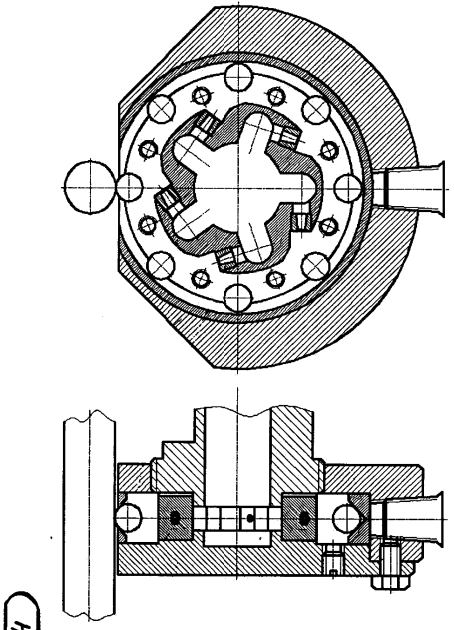
1	2
	<p>Отличается от инструмента (поз. 602) [131] тем, что хотя бы один из деформирующих элементов имеет возможность периодического подключения его токопровода ко второму полюсу источника тока. Положительный эффект достигается за счет одновременного силового, теплового (теплота трения и теплота, выделяемая при прохождении электрического тока) и электрического воздействий, управляемых и регулируемых параметрами электрического тока и режимами обработки. Предназначен для упрочняющей обработки твердых и высокопрочных малопластичных материалов [136]</p>

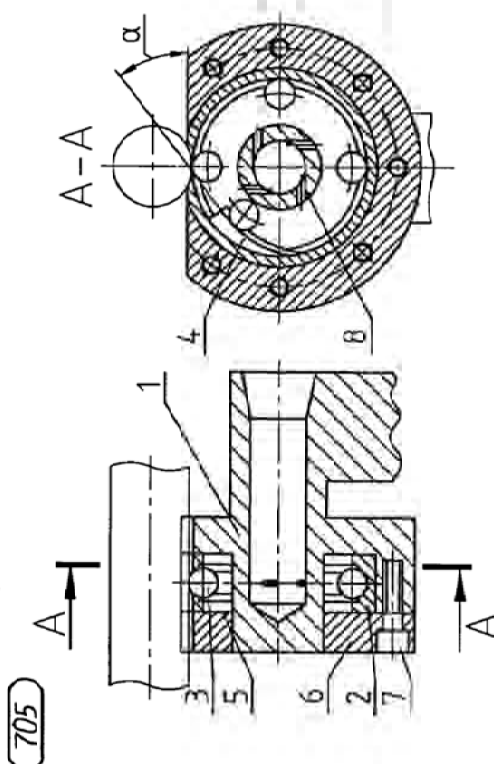
Таблица 4.3 – Основные разновидности инструментов для пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения

Конструктивная схема	Характеристика, отличительные особенности, назначение инструмента (накатника)
<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> <p>Отличается от инструмента (поз. 501) [96] тем, что в кольцевой камере расширения выполнено окно. Оно образовано плоскостью лыски, находящейся на расстоянии от центра меньшем, чем радиус беговой дорожки, и больше, чем траектория движения центров шаров, перекатывающихся по беговой дорожке, расположенной на периферии внутренней части камеры. Предназначен для обработки наружных поверхностей вращения [137]</p>
<p style="text-align: center;">702</p> 	<p>Содержит центробежный регулятор 1 частоты ударов деформирующих шаров, имеющий постоянный контакт с поверхностью обработки, кинематически связанный с кольцом-распределителем 2, получающим вращение от заготовки через регулятор 1. В кольце 2 выполнены радиальные каналы 3 с деформирующими шарами. Регулятор содержит медное кольцо 4, посредством которого он центрируется в неподвижном кольце 5, соединенном с корпусом 6 и образующем камеру расширения 7. Кольцо 5 также имеет радиальные каналы 8, связывающие камеру расширения 7 с каналами 3. Посредством регулирования силы прижима к заготовке башмака регулятора 1 изменяют частоту вращения распределителя 2. Повышается производительность процесса обработки [138]</p>

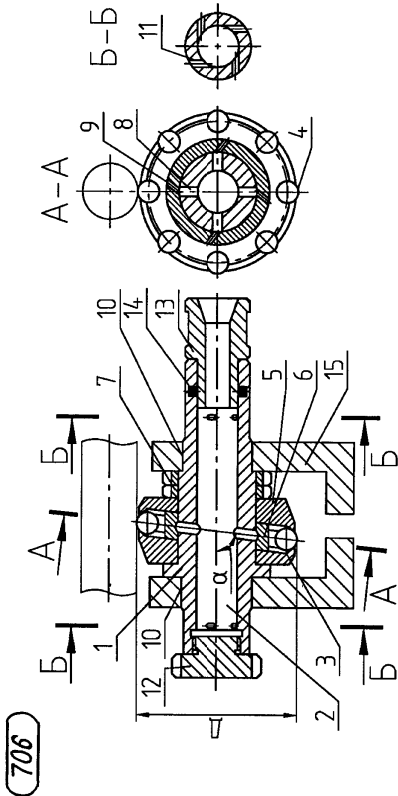
Продолжение таблицы 4.3

1	2
	<p>Содержит корпус 1 с приводными шарами 2, воздействующими на двухплечий рычаг 3, а последний — на подпружиненный индентор 4, который может быть выполнен под любым углом к продольной оси заготовки. Предназначен для обработки наружных поверхностей валов, галтелей [139]</p>
	<p>Конструктивная схема накатника отличается от инструмента (поз. 701) [137] тем, что профиль беговой дорожки выполнен треугольным симметричным, а прорезь выполнена на расстоянии от центра меньшем, чем радиус окружности максимального вылета шара, и больше, чем радиус расположения точки контакта шара обрабатываемой заготовкой. Также в инструменте вместо цилиндрических сопел применены сопла с коническим поперечным сечением [153]. Такое исполнение инструмента позволяет шарам развивать скорость большую, чем в инструменте-прототипе, т. к. исключает нежелательное высокочастотное маятниковое движение шаров поперек направления главного движения, что повышает производительность обработки и увеличивает глубину упрочнения обрабатываемой поверхности</p>

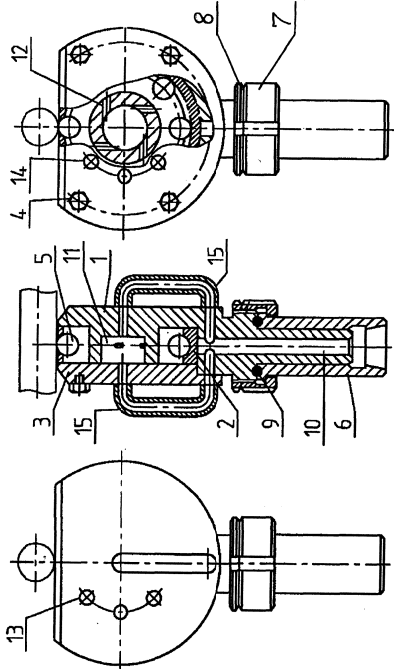
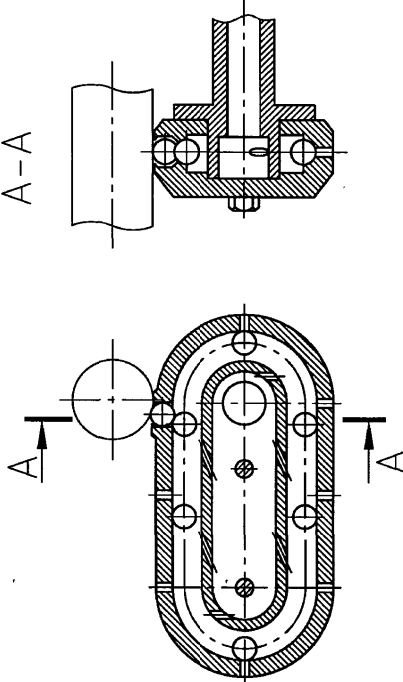
Продолжение таблицы 4.3

1	2
	<p>Инструмент состоит из корпуса 1, во внутреннюю полость которого вставлена имеющая вид кольца подшипника втулка 2. Кольцевая радиусная канавка кольца 2 служит беговой дорожкой для деформирующихся шаров 3. Во втулку 2 введена вставка 4, снабженная также радиусной канавкой и имеющая вид трамплина. Втулка 2 и вставка 4 через прокладку 5 посредством крышки 6 винтами 7 закреплены в расточке корпуса 1. Корпус 1, втулка 2 и крышка 6 снабжены вырезом, через который шары 3 имеют возможность ударного контакта с обрабатываемой поверхностью вала. Вставка 4 размещена в корпусе 1 таким образом, чтобы шары 3 при сходе с края трамплина, двигаясь по касательной к канавке вставки 4, имели ударный контакт с валом через вырез корпуса 1, втулки 2 и крышки 6. Приводом вращения шаров 3 служит сжатый воздух, подаваемый через осевое отверстие корпуса 1 и тангенциальные к нему сопла 8. Целью представленной кинематической схемы инструмента является повышение глубины наклепа обрабатываемой заготовки</p>

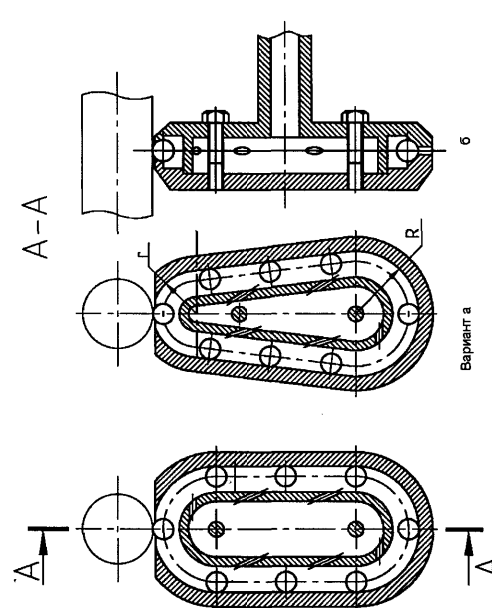
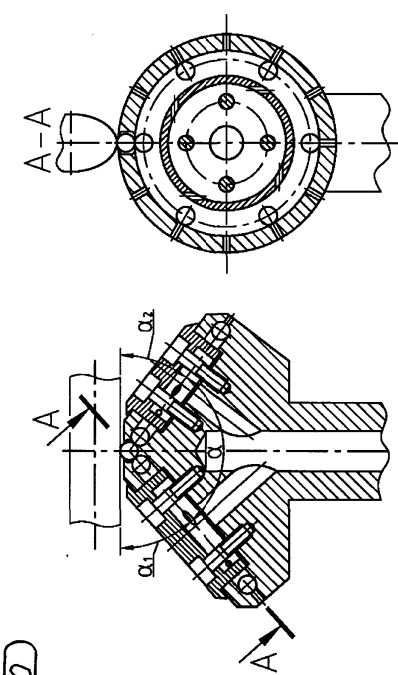
Продолжение таблицы 4.3

1	2
	<p>Инструмент состоит из корпуса 1, имеющего осевое отверстие 2. Кольцевая канавка 3 для размещения деформирующих шаров 4 образована двумя наклонными торцами боковых дисков 5, снабженными по периферии ограничительными козырьками, образующими призматическую беговую дорожку для шаров 4. Ширину кольцевой канавки 3 определяет распорная втулка 6. Две гайки 7 служат для поджима дисков 5 и 6 к бурту корпуса 1. Для подачи сжатого воздуха из осевого отверстия 2 корпуса 1 в кольцевую канавку 3 служат радиальные отверстия 8 корпуса 1 и тангенциальные отверстия 9 втулки 6. На корпусе 1 по обеим сторонам дисков 5 размещены цилиндрические цапфы 10, рядом с которыми расположены тангенциальные к осевому отверстию 2 сопла 11. Осевое отверстие 2 корпуса 1 с одной стороны закрыто резьбовой пробкой 12, а с другой в него входит штуцер 13. Между контактирующими цилиндрическими поверхностями корпуса 1 и штуцера 13 установлены уплотнительные кольца 14. Данная конструкция инструмента позволяет повысить производительность обработки с помощью эффекта П. А. Ребиндера</p>

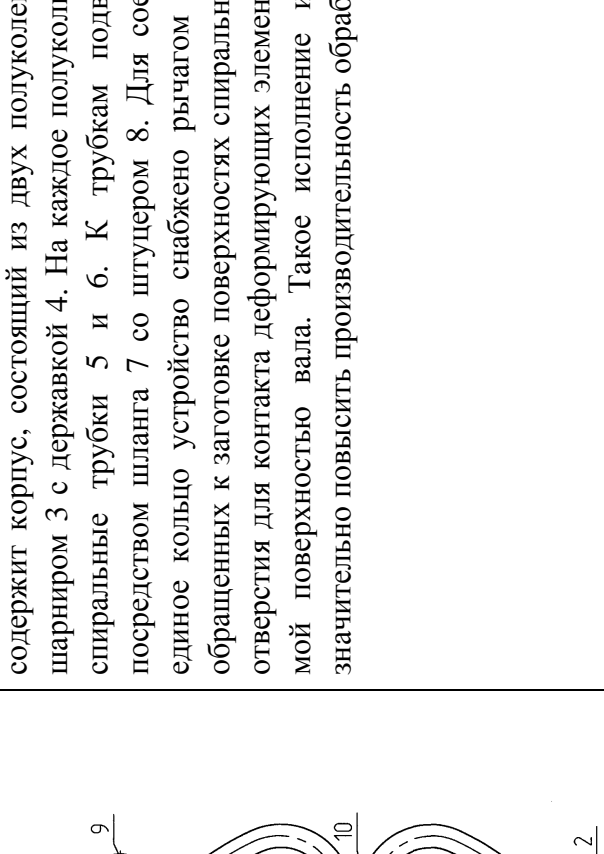
Продолжение таблицы 4.3

2	1
<p>Инструмент состоит из корпуса 1, во внутренней полости которого размещена втулка 2. Втулка 2 закреплена в корпусе 1 крышкой 3 с помощью винтов 4. Внутри кольцевой канавки, образованной стенками корпуса 1, крышки 3, а также внутренней поверхностью втулки 2, размещены деформирующие шары 5. Цилиндрический конец корпуса 1 имеет возможность вращения в оправке 6. Корпус 1 в оправке 6 удерживается от выпадения накидной гайкой 7 и контргайкой 8. Для уменьшения трения при вращении корпуса 1 относительно оправки 6 между их торцами размещены шарики 9. Осевое отверстие цилиндрического конца корпуса 1 сообщается с его внутренней полостью 11 через отверстия в двух симметричных переходниках 15. С кольцевой канавкой полость 11 соединена тангенциальными соплами 12. Для выхода отработанного сжатого воздуха в атмосферу из кольцевой канавки служат отверстия 13 и 14, размещённые в торцах корпуса 1 и крышки 3</p>	
<p>Особенность данной конструктивной схемы инструмента состоит в том, что с целью увеличения силы удара деформирующих шаров по обрабатываемой поверхности в стенке, содержащей прямолинейные и радиусные участки камеры расширения, деформирующий шар размещен на ее прямолинейном участке. Глубина наклепа возрастает при обработке</p>	

Продолжение таблицы 4.3

1	2
<p>(709)</p>  <p>Вариант а</p>	<p>С целью уменьшения потерь на трение при перемещении шаров внутри камеры расширения представленная конструктивная схема инструмента имеет радиусные участки камеры расширения, которые соединены между собой прямолинейными участками (вариант а). На рисунке (вариант б) для увеличения силы удара деформирующихся шаров по обрабатываемой поверхности участков камеры расширения, снабженный отверстием для контакта деформирующихся шаров с поверхностью заготовки, выполнен с меньшим радиусом, чем ему противолежащий</p>
<p>(710)</p> 	<p>Для увеличения частоты ударов деформирующего шара по обрабатываемой поверхности представленная конструктивная схема инструмента снабжена двумя камерами расширения, плоскости которых смещены по отношению друг к другу под углом α, отличным от нуля. Для получения на обрабатываемой поверхности лунок различной глубины камеры расширения могут иметь разный диаметр, а их плоскости могут быть размещены под разными углами α_1 и α_2 к обрабатываемой поверхности</p>

Окончание таблицы 4.3

1	2
	<p>Устройство для обработки валов пластическим деформированием [160] содержит корпус, состоящий из двух полуколец 1 и 2, соединенных шарниром 3 с державкой 4. На каждое полукольцо навиты замкнутые спиральные трубки 5 и 6. К трубкам подведен сжатый воздух посредством шланга 7 со штуцером 8. Для соединения полуколец в единое кольцо устройство снабжено рычагом 9 с защелкой 10. На обращенных к заготовке поверхностях спиральных трубок выполнены отверстия для контакта деформирующих элементов 11 с обрабатываемой поверхностью вала. Такое исполнение инструмента позволит значительно повысить производительность обработки</p>

Таким образом, получаемая при обработке сетка сферических углублений, в зависимости от функционального назначения контактируемых поверхностей, может служить своего рода резервуаром для масла или условием хорошей гидроплотности соединения.

4.8 Класс конструктивных схем инструментов для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей

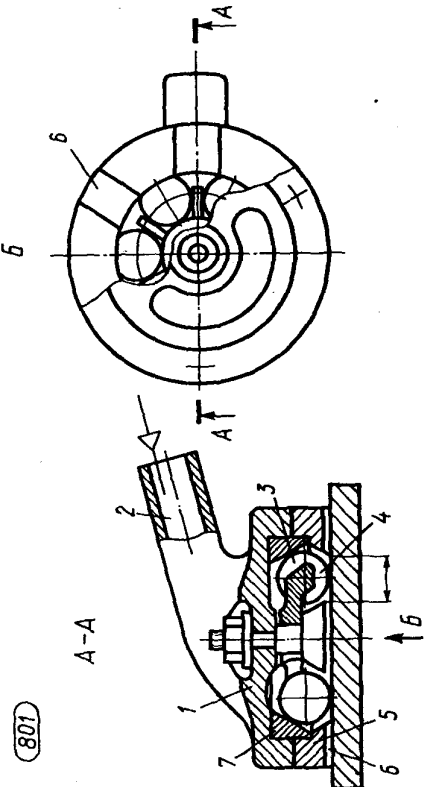
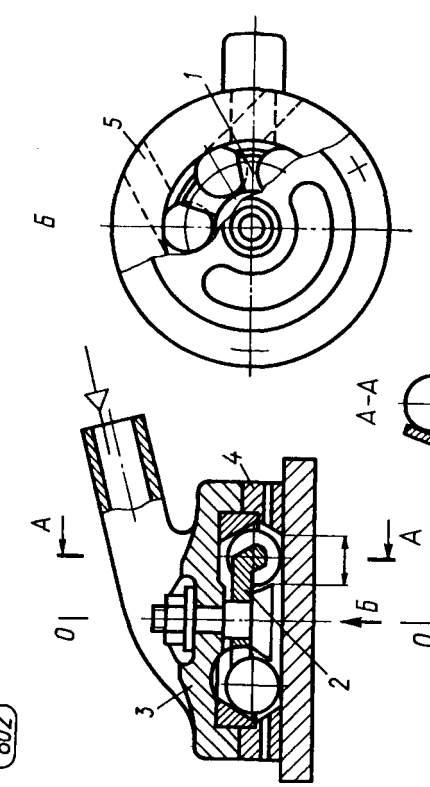
Накатники для обработки плоских поверхностей (таблица 4.4) обладают широкими технологическими возможностями, которые заключаются в снижении шероховатости поверхности (поз. 801, 802, 804...806), ее вибронакатывании с получением специфического рисунка – масляных каналов (поз. 803).

Схема одного из наиболее универсальных накатников приведена в таблице 4.4 (поз. 804). Этими инструментами обрабатывают заготовки из черных и цветных металлов. Одним и тем же инструментом, образуя углубления, можно создавать системы с несоприкасающимися, частично перекрывающимися друг друга и полностью перекрывающими исходную поверхность лунками, а также получать на поверхностях в зависимости от технических требований частично нерегулярный или нерегулярный микрорельеф.

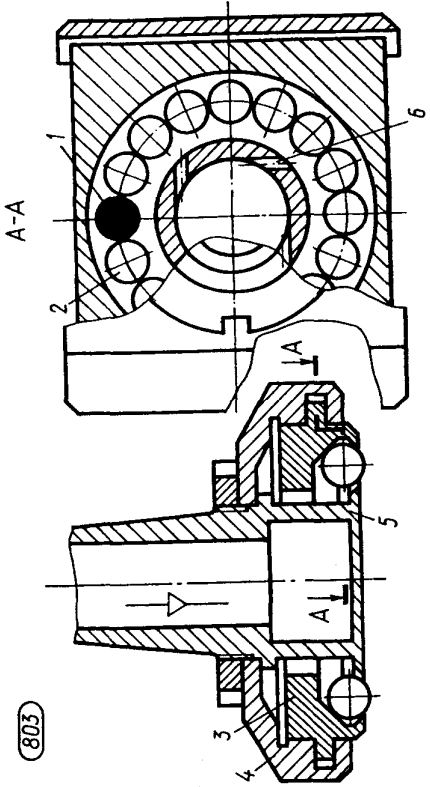
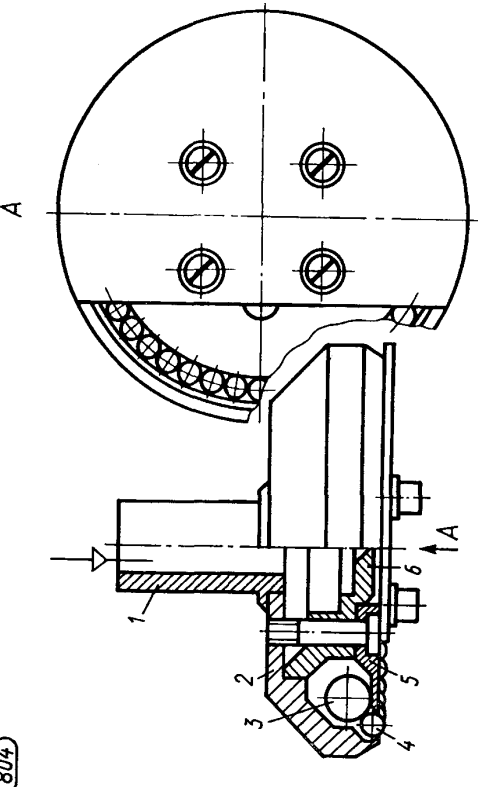
Кроме того, обеспечивается совмещенная размерно-чистовая и упрочняющая обработка (поз. 807).

Микрорельефы образуются под воздействием шаров с помощью режимов процесса обработки, конструктивных параметров инструмента. Так, например, после ПВДО инструментом (поз. 804) поверхности заготовки из стали 35 обеспечивается получение шероховатости 0,5...1,8 мкм с микрорельефом в виде сетки лунок при исходной шероховатости 0,45...0,65 мкм, полученной шлифованием. Подача S стола станка с заготовкой при обработке – 40...900 мм/мин. Давление сжатого воздуха P , подводимого к инструменту, – 0,38...0,4 МПа. Достигается получение гладкой поверхности, т. е. без лунок, при давлении сжатого воздуха $P = 0,2$ МПа, $h = 2...2,5$ мм и $S = 56$ мм/мин. Обработку пазов в заготовках можно осуществлять инструментом (поз. 806).

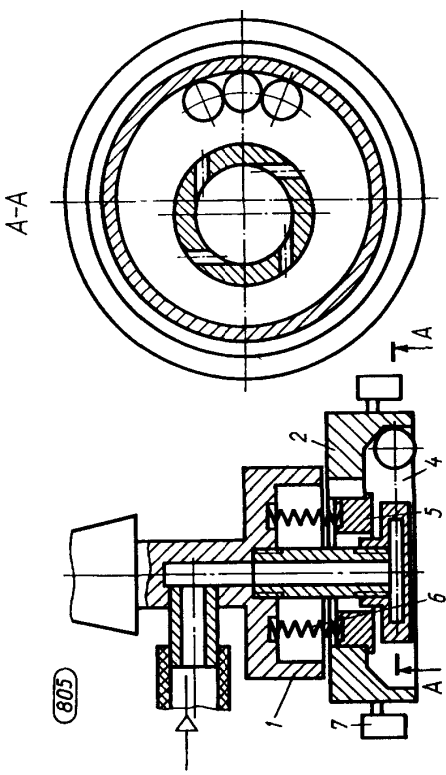
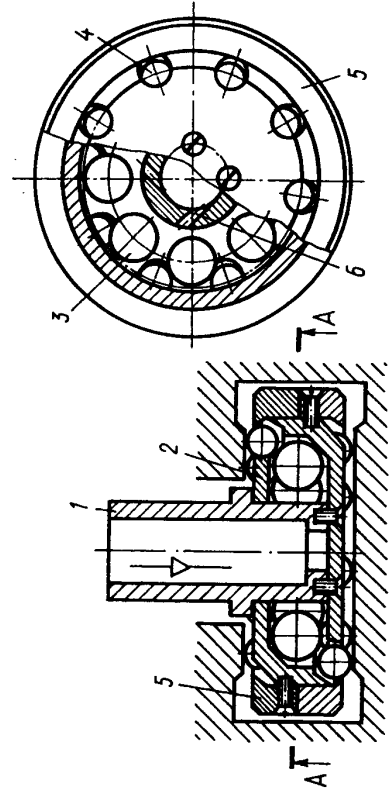
Таблица 4.4 – Основные разновидности инструментов для пневмодинамической отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей, пазов

Конструктивная схема	Характеристика, отличительные особенности, назначение инструмента (накатника)
<p data-bbox="395 1928 419 1989">(801)</p> 	<p data-bbox="347 689 371 712">2</p> <p data-bbox="383 197 699 1193">Состоит из корпуса 1 с отверстием 2 для подвода струй сжатого воздуха к деформирующим шарам 3. Последние помещены в камере расширения и разделены сепаратором 4 в виде лопастного колеса, имеющего возможность совместного с шарами вращения. К корпусу примыкает диск 5, на торце которого имеются радиально расположенные каналы 6 для выхода отработанной рабочей среды в атмосферу. Между корпусом 1 и диском 5 установлено рабочее кольцо 7. Интенсифицируется процесс обработки [140]</p>
<p data-bbox="853 1928 877 1989">(802)</p> 	<p data-bbox="837 197 1153 1193">Отличается от инструмента (поз. 801) [140] тем, что лопасти 1 сепаратора 2 установлены под углом к оси 0-0 корпуса 3 и создают поджатию шаров к обрабатываемой поверхности. В диске 4 выполнены тангенциально расположенные каналы 5 для выхода отработанной рабочей среды в атмосферу. Их направление совпадает с направлением вращения деформирующих шаров. Снижается аэродинамическое сопротивление воздуха при выходе в атмосферу. Интенсифицируется процесс обработки [141]</p>

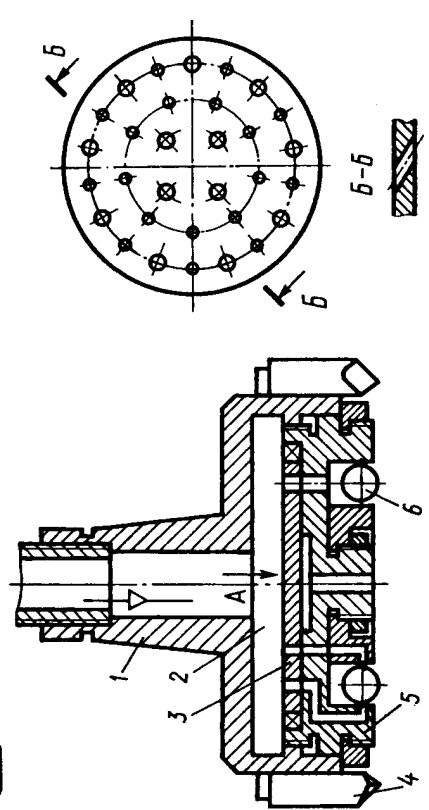
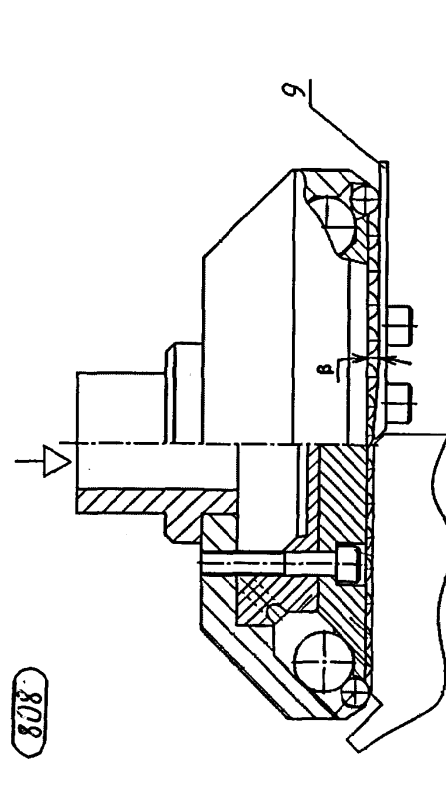
Продолжение таблицы 4.4

<p style="text-align: center;">1</p>  <p style="text-align: center;">803</p>	<p style="text-align: center;">2</p> <p>Отличается от инструмента (поз. 801) [140] тем, что один из деформирующих шаров 1 имеет массу большую, чем остальные деформирующие шары. Имеется ползун 3, в котором размещены шары. Он установлен в корпусе 4 и имеет возможность возвратно-поступательных перемещений совместно с шарами. Шар 1 возбуждает возвратно-поступательное перемещение ползуна 3. Корпус 4 смонтирован на оправке 5, в которой предусмотрены сопла 6 для направления струй сжатого воздуха на шары 1, 2. Обеспечивается вибронакатывание поверхности [142]</p>
<p style="text-align: center;">A</p>  <p style="text-align: center;">804</p>	<p>Состоит из оправки 1 с корпусом 2. В нем расположены приводящие 3 и деформирующие шары (бойки) 4. Оба кольцевых ряда шаров зафиксированы в камере расширения посредством диска 5 и стакана 6, в котором выполнены сопла, предназначенные для направления струй сжатого воздуха на шары 3, 4 обоих кольцевых рядов. Шары осуществляют движение в одном направлении, но с разной скоростью. Обеспечивается получение гладкой поверхности и микрорельефа с различной плотностью расположения лунок [14]</p>

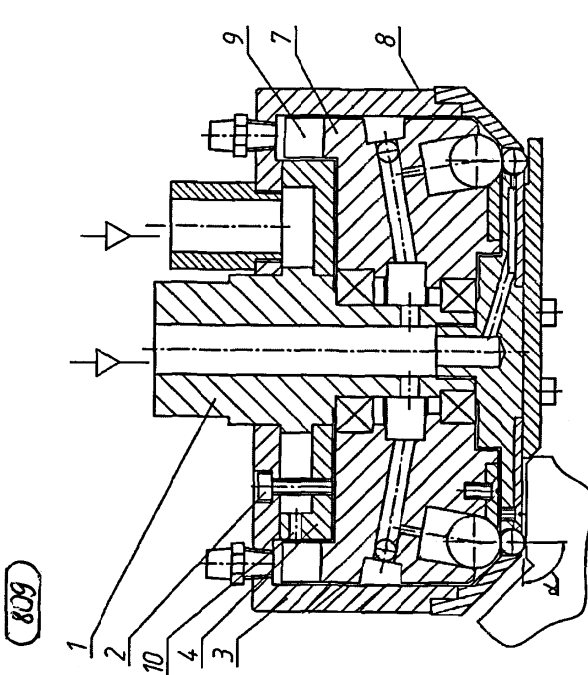
Продолжение таблицы 4.4

1	2
 <p>805</p>	<p>Содержит корпус 1, несущий обойму 2 с деформируемыми шарами 3, расположенными в кольцевой канавке 4. Обойма 2 соединена с корпусом 1 посредством диска 5 и пружин 6, обеспечивающих возможность осевого и радиального перемещения относительно корпуса 1. На обойме 2 жестко закреплен магнит 7, выполненный в виде охватывающего обойму 2 кольца. Величина осевого усилия деформирующих шаров зависит от формы поверхности кольцевой канавки и усилия, создаваемого магнитом 7. Повышается качество обработки за счет значительного проскальзывания деформирующих шаров по обрабатываемой поверхности [143]</p>
 <p>806</p>	<p>Содержит оправку 1 с обоймой 2, состоящей из двух колец и образующих камеру расширения. В последней помещены приводящие шары 3, а в ее боковых стенках выполнены локальные гнезда с размещенными в них деформируемыми шарами 4, вылет которых ограничен втулками 5. Привод вращения деформирующих шаров осуществляется посредством струй сжатого воздуха, направляемых соплами 6. В процессе обработки инструменту сообщают вращательное движение, а заготовке – продольную подачу. Обеспечивается обработка плоских поверхностей, пазов [93]</p>

Продолжение таблицы 4.4

<p>807</p> 	<p>2</p> <p>Содержит корпус 1 с кольцевой камерой 2, над которой установлена имеющая возможность вращения диафрагма 3 с наклонными каналами. В корпусе инструмента 1 установлены режущие элементы 4, а внутри расположена накатная головка 5, в кольцевой камере расширения которой находятся деформирующие шары 6. В диафрагме и накатной головке выполнена система каналов, через которые сжатый воздух поступает к деформирующим шарам. Повышение качества обработкиваемой поверхности обеспечивается за счет комбинированной обработки, т. е. фрезерования и последующего поверхностного пластического деформирования [144]</p>
<p>808</p> 	<p>Отличается от инструмента (поз. 804) [14] отсутствием нетехнологичного профиля, а часть горизонтальной плоскости экрана выполнена на расстоянии от корпуса, обеспечивающем перемещение по ней деформирующих шаров, но исключающим их контакт с приводящими шарами. Деформирующие шары при входе в зону обработки под углом β приподнимаются по наклонной плоскости, выполненной на экране 9. Такое исполнение инструмента позволяет упростить конструкцию, повысить надежность, стойкость шаров, производительность, стабильность и качество обработки [56, 57]</p>

Окончание таблицы 4.4

	<p style="text-align: center;">2</p> <p>Инструмент оснащен пневматическим роторным двигателем и имеет принципиально новую динамику процесса обработки, состоит из полого вала 1, на котором с помощью винтов 2 закреплены корпус 3 и сопловый аппарат 4. На вал 1 посредством шарикоподшипников установлен диск 7 с отверстиями для размещения приводящих шаров 8 и лопатками 9. В сопловом аппарате 4 выполнены сопла 10, предназначенные для направления струй сжатого воздуха на лопатки диска 9. Инструмент позволяет повысить производительность процесса обработки и уменьшить уровень звукового давления [59]</p>
---	--

5 Исследование пневмоцентробежной обработки внутренних цилиндрических поверхностей при неподвижной заготовке

5.1 Исследование влияния аэродинамических характеристик процесса и инструмента на качество обработанной поверхности

Исследования проводились на специальной установке (рисунок 5.1) с гидрофицированной системой подачи инструмента. Пневмогидравлическая установка состоит из рабочей камеры 1, в которой смонтирован трехкулачковый патрон 2 для закрепления заготовки с размещенным в ней пневматическим шариковым накатником 3 центробежного действия. Последний имеет возможность вертикального перемещения от гидроцилиндра 4 с функциональным управлением через пульт управления гидростанции 5. Величина подачи инструмента S регулируется в пределах 40...1600 мм/мин.

Рабочее перемещение деформирующих шаров в инструменте 3 осуществляется под действием струй сжатого воздуха, направляемого соплами, которые расположены в его корпусе, и поступающего в его осевую полость от системы питания – воздушной сети. Для обеспечения нормальных условий работы оператора внутренняя полость рабочей камеры установки выполнена со звукоизоляцией.

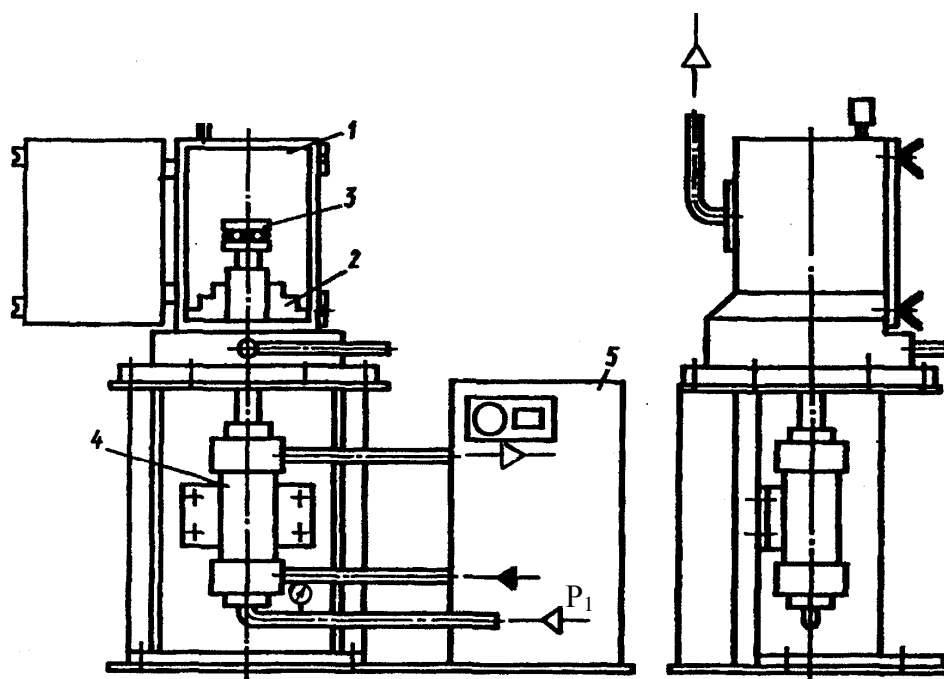
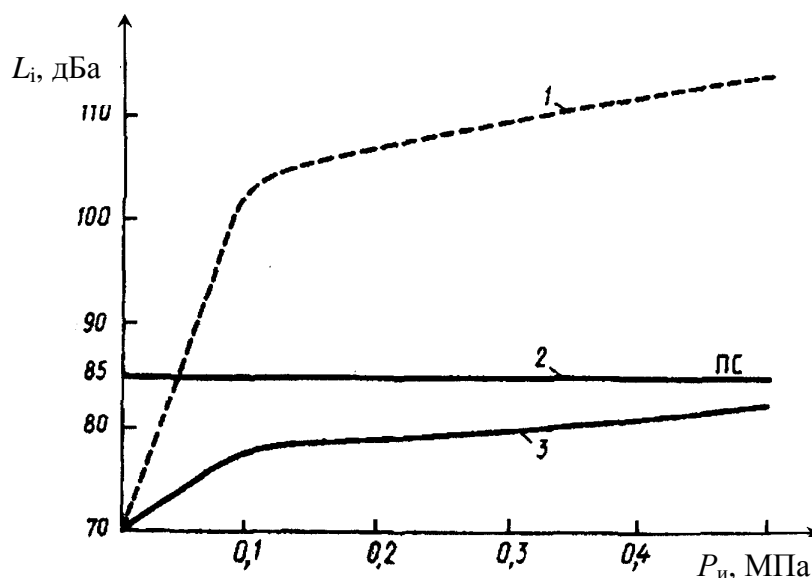


Рисунок 5.1 – Пневмогидравлическая установка

На рисунке 5.2 показаны спектры шумов одного из типовых инструментов без защиты от звука и в защищенной камере. Наличие различного рода сопротивлений в воздушной сети, от главной магистрали воздуховода цеха до входа в осевую полость оправки инструмента, создает перепад давлений, влияющий на качественную и количественную оценки процесса ПВДО.

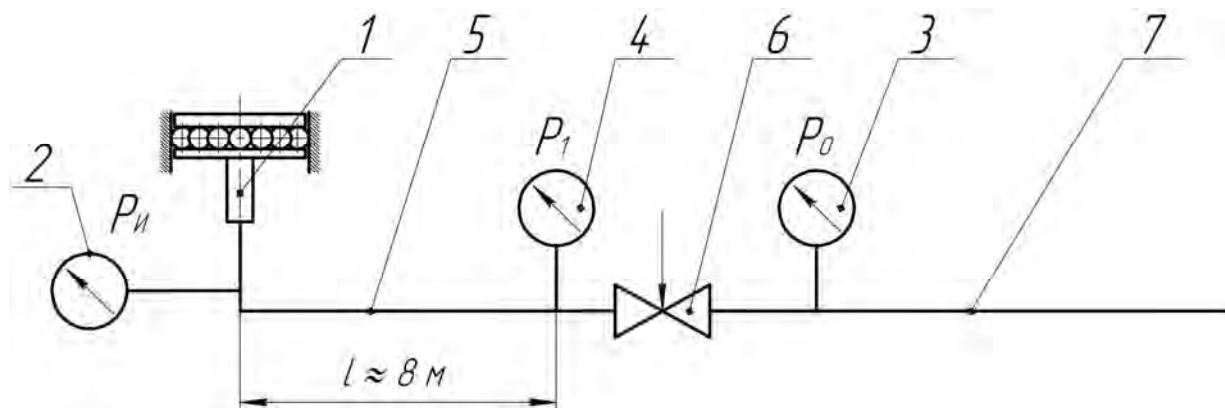


1 – спектр шума раскатника МК-20 без защиты от звука; 2 – предельный допустимый спектр шума; 3 – спектр шума раскатника МК-20 с защитой от звука

Рисунок 5.2 – Влияние подводимого к инструменту давления P_i на величину звукового давления

Модернизация установки (см. рисунок 5.1) в соответствии со схемой пневмосистемы (рисунок 5.3) позволила исследовать и учесть влияние местных сопротивлений на давление сжатого воздуха, подводимое к осевому каналу инструмента в процессе его работы для трех типоразмеров накатников: МК-10 (наружный диаметр – 64,5 мм, диаметр сопел – 3,2 мм, их количество – 8 шт., диаметр шаров – 7,983 мм); МК-20 (наружный диаметр – 119 мм, диаметр сопел – 4 мм, их количество – 8 шт., из них четыре сопла расположены на одной из торцевых стенок расширительной камеры инструмента, а четыре других – в осевой плоскости вращения шаров, диаметр шаров 16 мм); МК-30 (наружный диаметр – 126 мм, диаметр сопел – 3 мм, их количество – 16 шт., они расположены по 8 шт. на каждой из торцевых поверхностей расширительной камеры инструмента, а также шесть сопел диаметром по 2 мм находятся в осевой

плоскости вращения шаров, имеющих диаметр 12,7 мм). Внутренний диаметр осевого канала инструмента и шланга составлял 20 мм.



1 – накатник; 2–4 – манометры; 5 – расположение шланга между накатником и манометром 4; 6 – вентиль; 7 – главная воздушная магистраль цеха; $P_{и}$ – давление сжатого воздуха, подводимого в осевую полость инструмента; P_1 – давление сжатого воздуха, регулируемое вентилем 6 от воздушной магистрали цеха 7; P_0 – давление сжатого воздуха в пневмосети цеха

Рисунок 5.3 – Упрощенная схема пневмосистемы для ПЦО заготовок

На рисунке 5.4 показано, что потери давления сжатого воздуха на входе в осевую полость инструмента от всех видов сопротивлений для упомянутых накатников различаются. В исследованиях, выполненных ранее [14], давление сжатого воздуха при ПВДО учитывалось не на входе в осевую полость инструмента ($P_{и}$), а в трубопроводе (P_1), соединенном с главной воздушной магистралью цеха вентилем [64, 65].

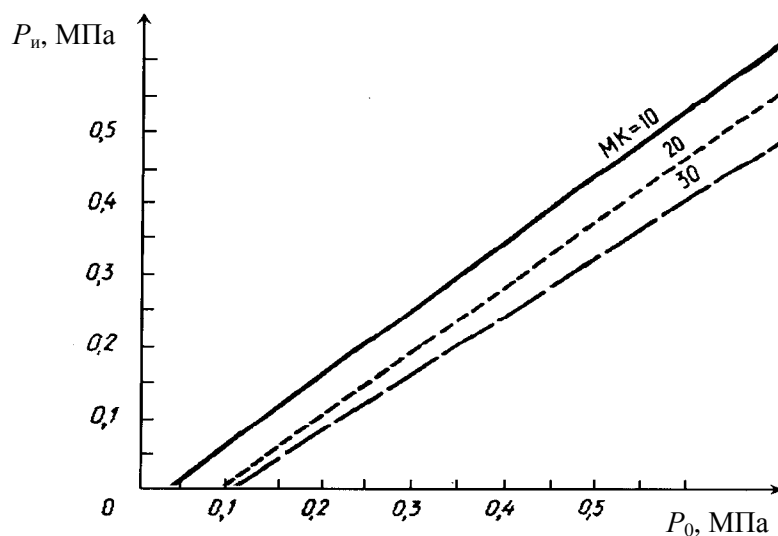
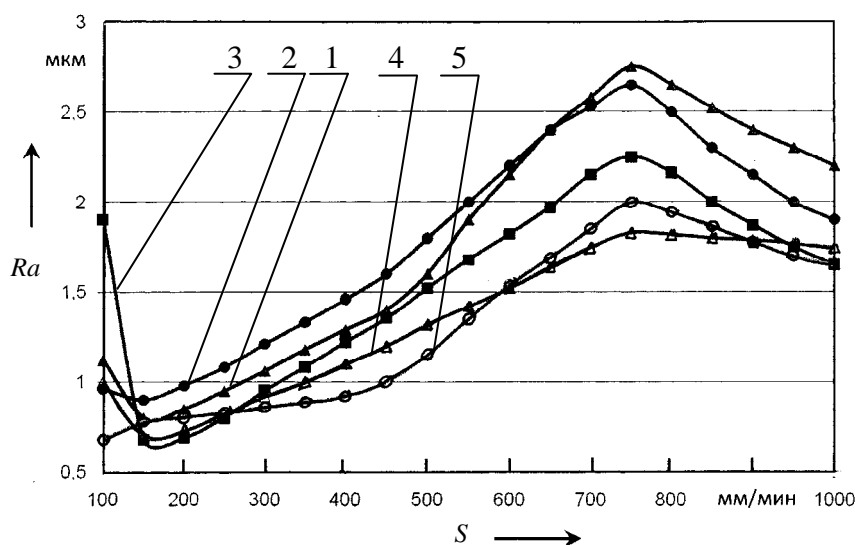


Рисунок 5.4 – Влияние местных сопротивлений сети на подводимое к инструменту давление $P_{и}$ в зависимости от давления в пневмосети цеха P_0

Для определения влияния аэродинамических характеристик процесса и инструмента на качество обработанной поверхности для невращающейся при ПВДО заготовки использованы раскатник МК-20 и установка. Материал заготовки-штулки – сталь 35. Внутренняя цилиндрическая поверхность каждой заготовки растачивалась перед ПВДО на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Исходная шероховатость поверхности после растачивания $Ra \geq 3,2$ мкм. Согласно рисунку 5.5, с увеличением подачи инструмента при ПВДО шероховатость поверхности снижается незначительно.

Оптимальное значение шероховатости поверхности $Ra = 0,6...1$ мкм обеспечивается при $S = 150$ мм/мин и давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,3$ МПа, а также при осевом зазоре шаров в расширительной камере инструмента, равном 0,1 мм. На рисунке 5.5 представлена зависимость $Ra = f(S, a)$, где a – разность между номинальными размерами: внутренним диаметром обрабатываемой поверхности и наружным диаметром инструмента.



1 — $a = 0,2$ мм; 2 — $a = 0,4$ мм; 3 — $a = 0,8$ мм; 4 — $a = 1,0$ мм; 5 — $a = 1,2$ мм

Рисунок 5.5 – Влияние подачи инструмента S и величины a на шероховатость раскатанной поверхности Ra при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,3$ МПа

При росте давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту, до $P_0 = 0,4$ МПа и постоянных параметрах (исходная шероховатость поверхности $Ra = 3,2$ мкм, величина осевого зазора шаров в расширительной камере $\delta = 0,1$ мм) наблюдается более интенсивное увеличение высоты

микронеровностей поверхности от 1 до 1,75 мкм при подаче от 100 до 1000 мм/мин (рисунок 5.6).

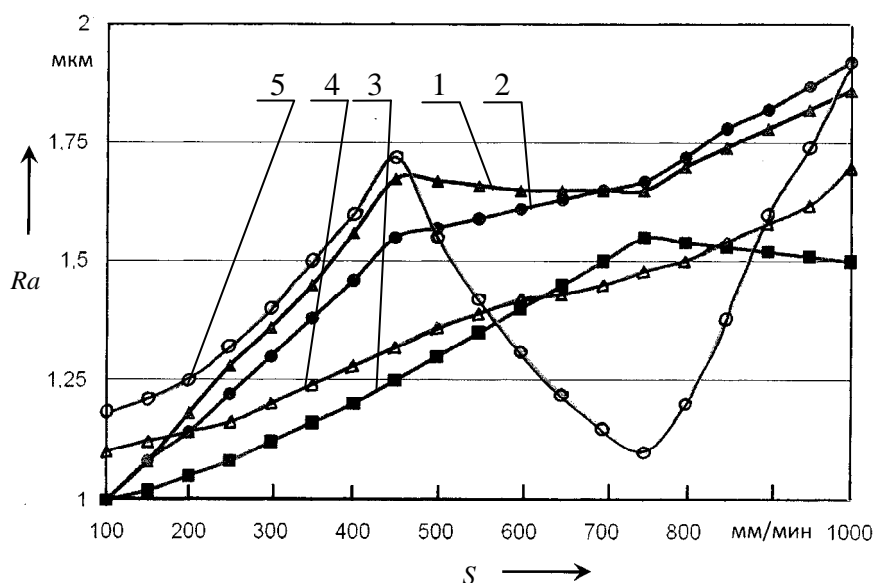


Рисунок 5.6 – Влияние подачи инструмента S и величины a на шероховатость накатанной поверхности Ra при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,4$ МПа (численные значения a такие же, как на рисунке 5.4)

На рисунке 5.7 представлены зависимости $Ra = f(S, a)$ при $P_1 = 0,5$ МПа и величине осевого зазора шаров в расширительной камере инструмента $\delta = 0,1$ мм, а также при различных внутренних диаметрах обрабатываемых поверхностей втулок. Значение исходной шероховатости $Ra = 3,2$ мкм. Конечная шероховатость накатанной поверхности составляет $Ra = 0,6...1,6$ мкм, она зависит в основном от подачи, равной 50...1000 мм/мин.

Рассматривая графические зависимости, следует отметить, что они наиболее стабильны при $P_1 = 0,4...0,5$ МПа. В этом случае меньше разброс числовых значений и меньше угол наклона кривых к оси абсцисс.

Установлено [14], что при ПВДО поверхностей заготовок из пластичных материалов, например нетермообработанных сталей, бронз и т. д., важное значение имеет величина осевого зазора δ деформирующих шаров в расширительной камере инструмента. На рисунке 5.8 показано влияние δ на шероховатость раскатанной поверхности при различных значениях a [66].

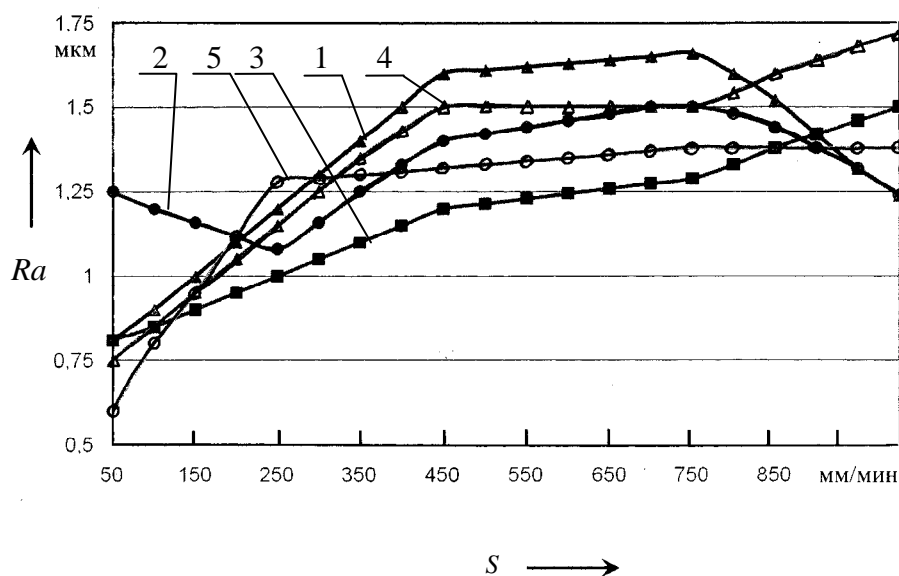


Рисунок 5.7 – Влияние подачи инструмента S и величины a на шероховатость накатанной поверхности Ra при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,5$ МПа (численные значения a такие же, как на рисунке 5.4)

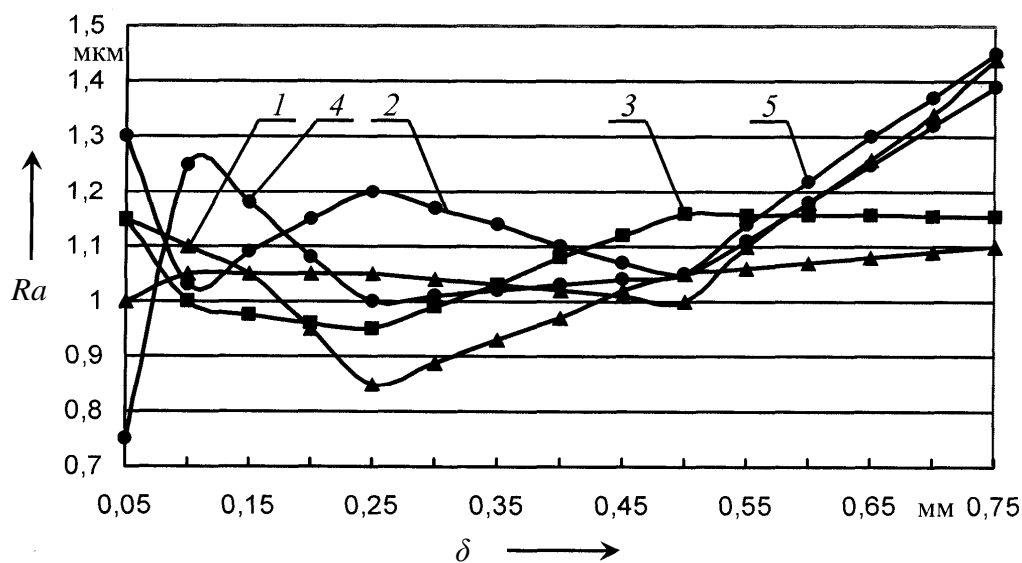


Рисунок 5.8 – Влияние осевого зазора δ деформирующего шара в расширительной камере инструмента и величины a на шероховатость накатанной поверхности Ra при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,4$ МПа

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1) для получения более низкой шероховатости поверхности предпочтительны чистовое, тонкое растачивание, шлифование перед ПВДО;

2) снижение шероховатости поверхности при невращающейся заготовке (материал – сталь 35, исходная шероховатость поверхности $Ra = 3,2$ мкм) обеспечивается в пределах $0,6...2$ мкм при $S = 50...1000$ мм/мин и $P_1 = 0,3...0,5$ МПа;

3) оптимальное значение осевого зазора шара в камере расширения инструмента $\delta \leq 0,05$ мм;

4) усредненное значение a составляет $0,2...0,3$ мм для исследованного диапазона диаметральных размеров обрабатываемых поверхностей.

5.2 Исследование процессов поверхностного пластического деформирования и тонкой абразивной обработки заготовок из закаленных сталей

Исследование влияния пневмоцентробежной обработки твердосплавными шарами на качество внутренних цилиндрических поверхностей с твердостью материала 62...64 HRC. Для исследования влияния режимов пневмоцентробежной обработки, т. е. подачи и давления воздуха в рабочей полости инструмента, на качество обработанной поверхности был проведен полнофакторный эксперимент. В качестве параметра оптимизации выбрана шероховатость поверхности Ra .

Эксперимент проводился для неподвижно закрепленной заготовки из стали ШХ15 (обрабатываемая поверхность диаметром 65 мм) на установке (см. рисунок 5.1), разработанной и изготовленной в филиале ОАО «БЕЛАЗ» управляющей компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» Могилевский автомобильный завод имени С. М. Кирова (далее – МоАЗ). Инструмент МК-10 был оснащен твердосплавными шарами диаметром 7,8 мм из вольфрамокарбидного сплава твердостью 89...91 HRA. Нижний уровень подачи инструмента соответствовал минимальной скорости перемещения шпинделя на данной установке. Верхний уровень подачи был увеличен в 2,3 раза. Значительное увеличение подачи, как показали предварительные эксперименты, требует большего количества проходов для обеспечения необходимой шероховатости поверхности.

Количество ходов определялось экспериментальным путем, оно равно 5. Увеличение числа ходов положительных результатов не дало, а привело к возрастанию шероховатости поверхности (рисунок 5.9).

Основные уровни давления воздуха в рабочей полости инструмента выбирались на основании предварительных экспериментов и исходя из давления в пневмосистеме в заводских условиях. Давление сжатого

воздуха в сети $P_1 = 0,4$ МПа, поэтому это значение было принято за верхний уровень, а нулевой и нижний уровни составили соответственно $P_1 = 0,3$ МПа и $P_1 = 0,2$ МПа.

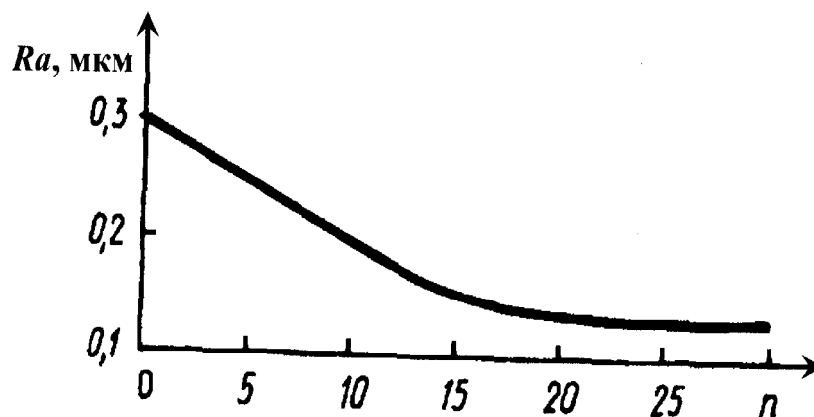


Рисунок 5.9 – Влияние количества рабочих ходов накатника n на шероховатость поверхности Ra

После обработки экспериментальных данных получено уравнение, отражающее зависимость шероховатости поверхности от ее исходного значения, давления воздуха в рабочей полости инструмента и подачи:

$$Y = 0,16 + 0,044X_1 - 0,019X_2 + 0,004X_3, \quad (5.1)$$

где X_1 , X_2 , X_3 – кодированные значения факторов.

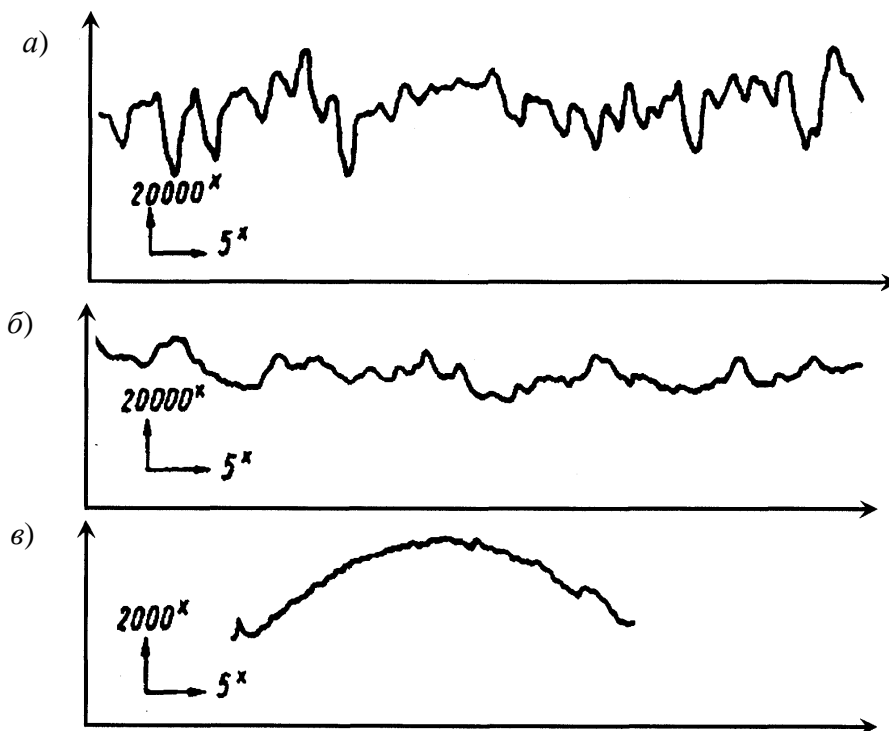
При анализе уравнения (5.1) установлено, что модель адекватна и значимыми являются коэффициенты $b_1 = 0,044$, $b_2 = 0,019$, т. к. они больше доверительного интервала, равного 0,009. Наибольшее влияние на качество поверхности оказывает исходное значение шероховатости поверхности.

В процессе пневмоцентробежной обработки можно уменьшить шероховатость поверхности примерно на 50 % (рисунок 5.10, таблица 5.1).

Дальнейшее увеличение количества проходов или рабочего давления в полости инструмента положительных результатов не дает. Изменение диаметральных размеров заготовки после обработки составляло не более 1 мкм.

Меньшее влияние на результат оказывает изменение давления воздуха в рабочей полости. Подача в выбранном для экспериментов интервале значений (от 6 до 14 мм/с) существенного влияния не оказывает, коэффициент $b_3 = 0,004$ меньше доверительного интервала, равного 0,009,

т. е. он не значим. Следовательно, для повышения производительности можно работать при больших подачах (14 мм/с) без снижения качества обработанной поверхности.



a – после тонкого растачивания; *б* – после пневмоцентробежной обработки; *в* – отклонение от образующей (0,012 мм)

Рисунок 5.10 – Профилограммы поверхностей

Таблица 5.1 – Матрица планирования и результаты экспериментального исследования обрабатываемости материала с твердостью 62...64 HRC

$Ra_{исх}$, мкм	P , МПа	S , мм/с	X_1	X_2	X_3	$Y(Ra)$, мкм
0,44	0,4	14	+	+	+	0,19
0,26	0,4	14	-	+	+	0,11
0,45	0,2	14	+	-	+	0,25
0,28	0,2	14	-	-	+	0,17
0,43	0,4	6	+	+	-	0,20
0,25	0,4	6	-	+	-	0,13
0,45	0,2	6	+	-	-	0,24
0,26	0,2	6	-	-	-	0,12
0,36	0,3	10	0	0	0	0,17
0,37	0,3	10	0	0	0	0,18
0,36	0,3	10	0	0	0	0,16

Установлено, что отдельные шары в процессе обработки разрушаются под воздействием виброударов. Это явление может быть использовано при оценке их качества производителем.

Результаты эксперимента при обработке поверхности инструментом с шарами из материала ШХ15. Для исследования влияния материала деформирующих шаров на качество обрабатываемой поверхности проведена обработка внутренних поверхностей (цилиндрических) инструментом, снабженным шарами из стали ШХ15 диаметром 7,983 мм при давлении сжатого воздуха 0,4 и 0,5 МПа и подаче 10 мм/с. Результаты эксперимента приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты экспериментальных исследований обрабатываемости материала с твердостью 62...64 HRC шарами из стали ШХ15

$P_1 = 0,5 \text{ МПа}$		$P_1 = 0,4 \text{ МПа}$	
$Ra_{\text{исх}}$, мкм	$Ra_{\text{кон}}$, мкм	$Ra_{\text{исх}}$, мкм	$Ra_{\text{кон}}$, мкм
0,65	0,36	0,66	0,40
0,39	0,18	0,32	0,16
0,40	0,22	0,38	0,20

Как показали результаты эксперимента, при заданных режимах обработки шероховатость поверхности снижается примерно на 50 %, т. е. при незначительном уменьшении производительности обработки заготовки с твердостью 60...64 HRC можно обрабатывать не только твердосплавными шарами, но и шарами из стали ШХ15. Изменение размеров после обработки – не более 1 мкм.

На основании изложенного можно сделать выводы:

1) при пневмоцентробежной упрочняющей обработке внутренних цилиндрических поверхностей с твердостью 60...64 HRC инструментом, снабженным шарами как из твердого сплава, так и из стали ШХ15, при давлении $P_1 = 0,3...0,5 \text{ МПа}$ шероховатость поверхности по сравнению с исходной снижается до 50 %;

2) при многопроходной обработке поверхностей отклонение от прямолинейности образующих увеличивается от 1 до 13 мкм, т. к. при входе и выходе деформирующих шаров в отверстие заготовки имеет место их неустановившееся движение. Для устранения этого недостатка рекомендуется устанавливать направляющие втулки перед входом шаров в зону обработки и выходом из нее.

Исследование влияния пневмоцентробежной обработки шарами из стали ШХ15 на качество внутренних цилиндрических поверхностей с твердостью материала 50...55 HRC. Для исследования влияния режимов пневмоцентробежной обработки проведен полнофакторный эксперимент [167]. В качестве параметра оптимизации выбрана шероховатость поверхности Ra . Основные уровни давления воздуха: верхний уровень $P_1 = 0,4$ МПа, нижний $P_1 = 0,2$ МПа и нулевой $P_1 = 0,3$ МПа. Верхний уровень подачи – 14 мм/с, нижний – 6 мм/с, нулевой – 10 мм/с. Количество проходов (пять) установлено экспериментальным путем. Матрица планирования и результаты опытов приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований обрабатываемости материала с твердостью 50...55 HRC

$Ra_{исх}$, мкм	P_1 , МПа	S , мм/с	X_1	X_2	X_3	$Y(Ra)$, мкм
0,8	0,4	14	+	+	+	0,39
0,38	0,4	14	–	+	+	0,18
0,78	0,2	14	+	–	+	0,46
0,4	0,2	14	–	–	+	0,28
0,79	0,4	6	+	+	–	0,37
0,41	0,4	6	–	+	–	0,17
0,81	0,2	6	+	–	–	0,44
0,4	0,2	6	–	–	–	0,26
0,6	0,3	10	0	0	0	0,34
0,61	0,3	10	0	0	0	0,30
0,59	0,3	10	0	0	0	0,31

После обработки экспериментальных данных получено уравнение, отражающее зависимость шероховатости поверхности от ее исходного значения, давления воздуха в рабочей полости инструмента и подачи:

$$Y = 0,318 + 0,096X_1 - 0,041X_2 + 0,0087X_3. \quad (5.2)$$

При анализе уравнения (5.2) установлено, что модель адекватна и значимыми являются коэффициенты $b_1 = 0,096$, $b_2 = 0,041$, т. к. они больше доверительного интервала $\Delta b_i = \pm 0,0096$. Наибольшее влияние на качество поверхности оказывает исходное значение шероховатости поверхности, наименьшее – изменение давления воздуха в рабочей полости инструмента. Подача в выбранном для эксперимента интервале значений существенно не влияет, коэффициент $b_3 = 0,0087$ меньше доверительного

интервала, равного 0,009, т. е. не значим. Следовательно, для повышения производительности можно работать на больших подачах (14 мм/с) без снижения качества обработки.

Таким образом, при пневмоцентробежной обработке деталей с твердостью материала 50...55 *HRC* инструментом, снабженным шарами из ШХ15, требуется не менее пяти проходов при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,2...0,4$ МПа для уменьшения шероховатости поверхности не менее чем на 50 % по сравнению с ее исходным значением.

Измерение осевого усилия и крутящего момента в процессе пневмоцентробежной обработки. Для измерения осевой силы и крутящего момента разработано устройство (рисунок 5.11), состоящее из корпуса 1, в котором с посадкой с зазором размещена обрабатываемая втулка 2 с неподвижно закрепленным на ней упором 3, кронштейна 4, установленного на корпусе 1 с двумя динамометрическими узлами, где находится корпус 5 с расположенными в нем втулкой 6, пружиной 7, шайбой 8 и винтом 9. Втулка 6 с упором 10 может перемещаться вдоль корпуса и наконечником касаться упора 3, а упором 10 – наконечника индикатора 11, установленного на корпусе 5. С помощью винта 9 регулируется усилие, необходимое для перемещения втулки 6.

Устройство работает следующим образом. Инструмент вводится в зону обработки (во втулку 2). Под действием сил, возникающих в процессе пневмоцентробежной обработки, втулка 2 начинает вращаться и перемещаться вдоль оси корпуса. Величина перемещений фиксируется с помощью индикаторов 11. Тарировку динамометрических узлов проводили в статическом положении с помощью гирь. Крутящий момент и осевые силы измерены для инструмента диаметром 65 мм с шарами диаметром 12,7 мм при различных давлениях. Результаты эксперимента представлены в таблице 5.4.

Следует отметить, что в процессе пневмоцентробежной обработки внутренних цилиндрических поверхностей осевая сила и крутящий момент имеют небольшие значения – 5 Н (при $P_1 = 0,3$ МПа) и 1 Н·м соответственно.

Поисковые исследования пневмоцентробежной абразивной обработки. Авторами была предпринята попытка определить возможность обработки заготовок колец подшипников из стали ШХ15 с твердостью материала ≤ 62 *HRC* свободными рабочими телами (шарами), выполненными из различных материалов: абразивных на вулканической основе; керамических, используемых в галтовочных барабанах; свинцовых, шаржированных абразивными зёрнами.

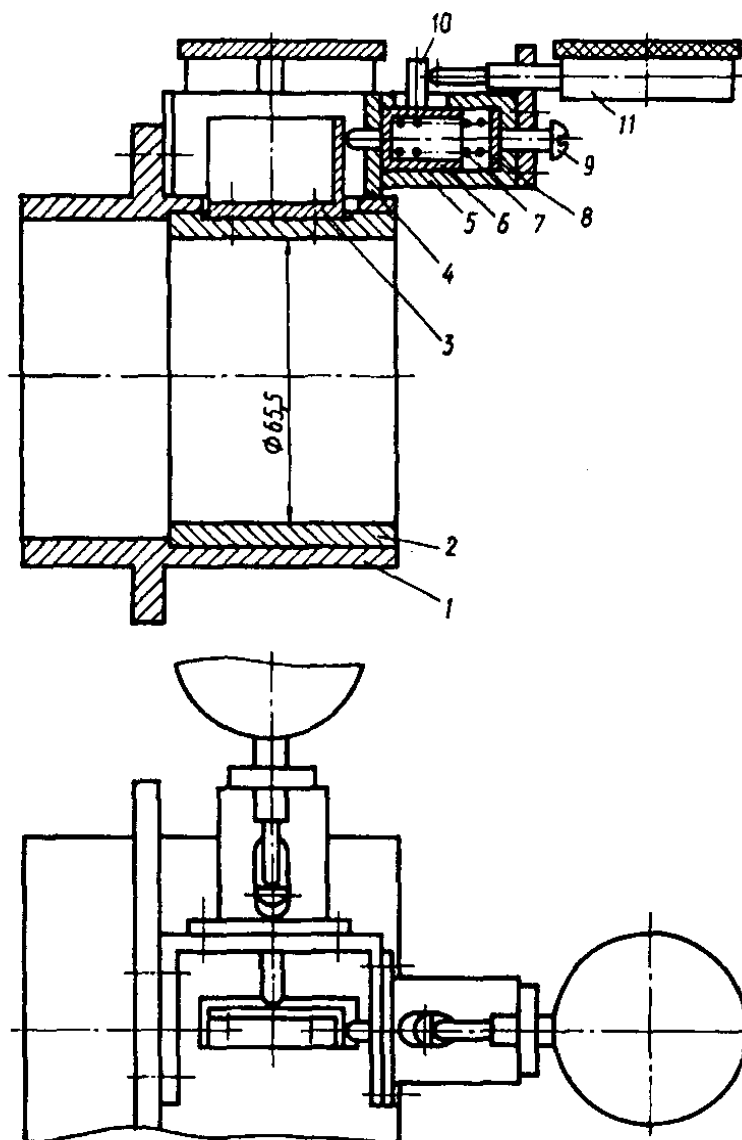


Рисунок 5.11 – Устройство для динамометрирования сил и крутящих моментов

Таблица 5.4 – Результаты измерений силы и крутящего момента при обработке отверстия диаметром 65 мм

Давление P_1 , МПа	Измерение			
	осевой силы		крутящего момента	
	Показание индикатора, мм	Осевая сила, Н	Показание индикатора, мм	Крутящий момент, Н · м
0,1	0,1	2	0,5	0,47
0,25	0,2	3	1	0,60
0,3	0,3	5	2	0,93

Обработка абразивными шарами на вулканитовой основе положительных результатов не дала. Они имеют малую массу и большую упругость, в результате нарушается процесс стабильного вращения шаров из-за их заклинивания, но при изготовлении рабочих тел на металлической основе с таким покрытием обработка поверхностей возможна.

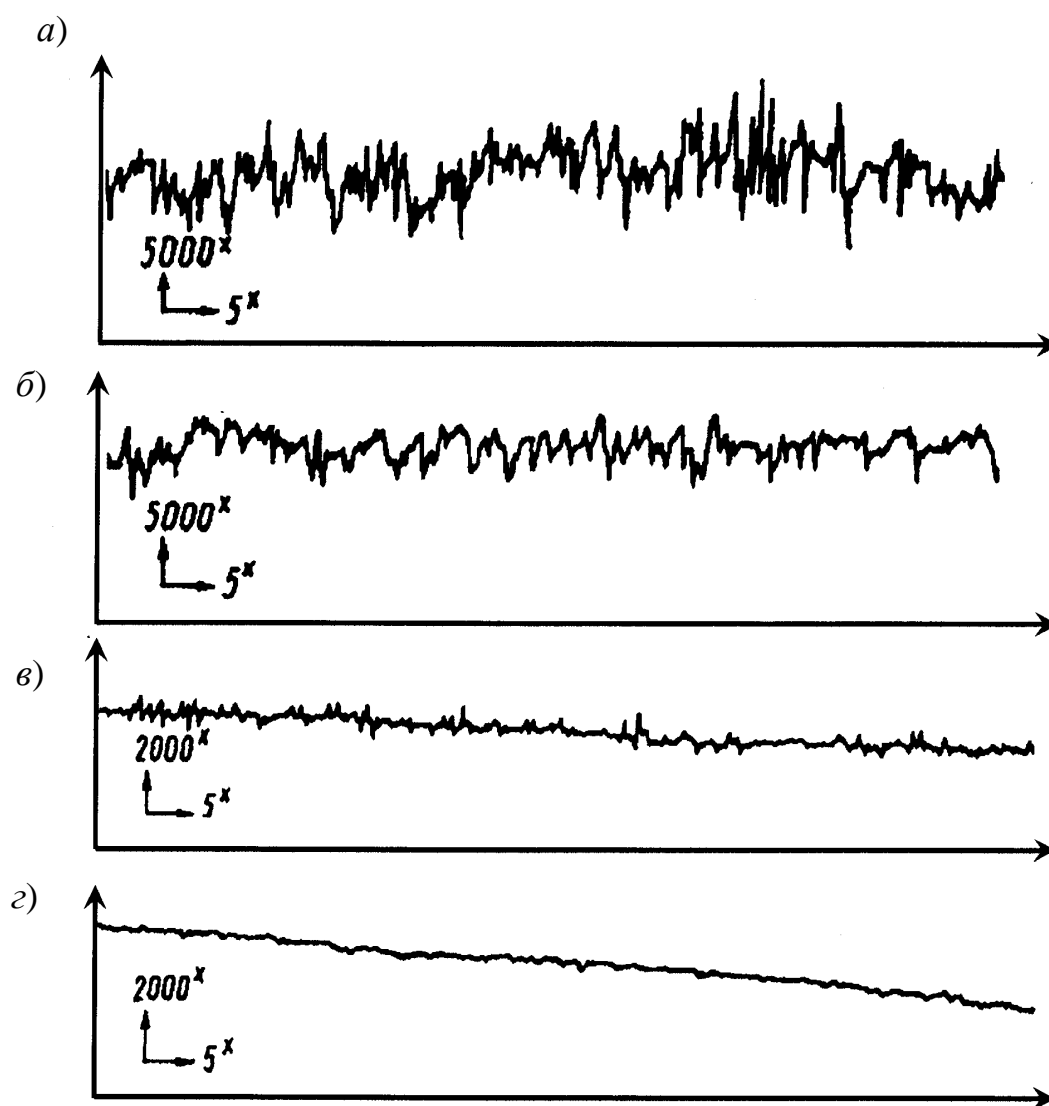
Результаты обработки поверхностей за два прохода при давлении воздуха $P_1 = 0,1$ МПа свинцовыми шарами, шаржированными алмазной пастой, показали, что шероховатость поверхности уменьшается с 0,18 до 0,1 мкм. Рабочие тела, изготовленные из свинца, можно применять только для полировальных работ, т. е. при исходной шероховатости поверхности, не превышающей 0,2 мкм.

Пневмоцентробежная обработка керамическими шарами осуществлялась при давлении воздуха в рабочей полости инструмента $P_1 = 0,15$ МПа. Повышение давления приводит к быстрому изнашиванию рабочих шаров, особенно в момент выхода и входа в зону обработки. Во время обработки происходит процесс микрорезания, позволяющий снять дефектный слой после шлифования. Количество проходов определялось экспериментальным путем при различных значениях исходной шероховатости. При исходной шероховатости $Ra = 0,4$ мкм требуется не менее 50 проходов ($S = 6$ мм/с). Как показали эксперименты, большие значения исходной шероховатости поверхности требуют и большего времени обработки, т. к. усилия прижима деформирующих шаров к обрабатываемой поверхности небольшие. Были обработаны заготовки колец подшипников и предварительно измерена шероховатость поверхности, отклонение от круглости, прямолинейности образующих и волнистость поверхности. Параметры определяли в измерительной лаборатории ОАО «Минский подшипниковый завод».

Согласно результатам исследований, шероховатость поверхности при данных условиях эксперимента обеспечивается в пределах 0,26...0,28 мкм. Отклонение от прямолинейности увеличивается в среднем от 0,6 до 1,3 мкм (рисунок 5.12).

Это объясняется тем, что при входе и выходе инструмента нарушается динамика установившегося воздушного потока и происходит меньший сьем металла с обрабатываемой поверхности. Увеличивается также и волнистость поверхности от 0,4 до 1,4 мкм. Изменение размера после обработки составляло 1...1,5 мкм на диаметр.

Отклонение от округлости от 0,3 до 3,6 мкм можно объяснить остаточными деформациями кольца при закреплении его в трехкулачковом патроне в процессе обработки.



a – после тонкого шлифования; *б* – после пневмоцентробежной абразивной обработки;
в – линейности образующей после тонкого шлифования; *г* – после пневмоцентробежной обработки

Рисунок 5.12 – Профилограммы поверхностей

Таким образом, пневмоцентробежную абразивную обработку можно выполнять инструментом с керамическими шарами с обеспечением шероховатости поверхности при данных режимах обработки в пределах 0,25...0,28 мкм. При этом отклонение от прямолинейности образующих увеличивается на 1 мкм [65].

5.3 Анализ результатов экспериментальных исследований качества механической обработки шатунов

Шатун является одним из типовых представителей неравножестких деталей. Цель исследований – улучшение качества изготовления шатунов дизельного двигателя мод. СМД-72 по всем контролируемым параметрам хонингованием и пневмоцентробежным накатыванием с установлением влияния наследственных связей на погрешности обработки.

В процессе исследований решались задачи выбора параметров для оценки погрешностей, возникающих за время хранения изделий, а также средств их контроля. Одна из особенностей задачи математической обработки экспериментальных данных – в конкретных производственных условиях могли быть использованы выборки небольшого объема (25...30 деталей). Это потребовало разработки математических методов, позволяющих восстанавливать зависимости по выборкам ограниченного объема, и создания специального программного обеспечения анализа данных.

Согласно техническим требованиям чертежа детали, допуски формы и расположения обработанных поверхностей шатунов не должны превышать 6 мкм (допуски круглости и профиля продольного сечения отверстия под вкладыши кривошипной головки шатуна); 40 мкм (допуски параллельности осей отверстия втулки, запрессованной в поршневую головку, и отверстия под вкладыш в кривошипной головке шатуна на длине 100 мм); 60 мкм (допуски перекоса осей отверстия втулки, запрессованной в поршневую головку, и отверстия под вкладыши в кривошипной головке шатуна на длине 100 мм).

Контролируемые параметры измеряли для двух партий шатунов 72-03102.60. Первую партию изготавливали по заводской технологии с отделкой отверстия в кривошипной головке хонингованием после алмазного растачивания на станке мод. ОС43543 до диаметра $90^{+0,01}_{-0,02}$. Вторую партию шатунов изготавливали с отделкой основного отверстия в кривошипной головке пневмоцентробежным накатником после алмазного растачивания до диаметра $90^{+0,015}_{-0,005}$. Пневмоцентробежное накатывание проводилось на модернизированном вертикально-сверлильном станке 2Н135 при режимах, обеспечивающих получение заданной шероховатости $Ra \leq 0,63$ мкм: скорость продольного перемещения накатника – 1 м/мин; количество проходов – 2; давление сжатого воздуха – 0,05...0,08 МПа. Изменение диаметральных размеров после накатки – 5...6 мкм.

Отклонение от правильной формы оценивали как разность наибольшего и наименьшего диаметров отверстия, измеренных в сечениях, которые показаны на рисунке 5.13.

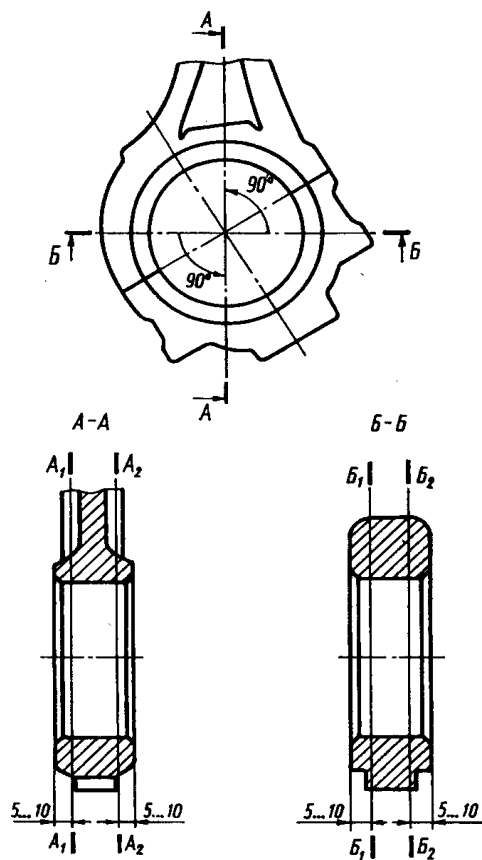


Рисунок 5.13 – Сечения, в которых выполнялись замеры диаметров отверстий шатуна

Измерения выполняли индикаторным нутромером повышенной точности мод. 154 по ГОСТ 9244-75 с пределом измерений 50...100 мм. Нутромер оснащен индикаторной головкой ИИГ ГОСТ 18833-73 с ценой деления 0,001 мм.

Отклонение от параллельности и перекос осей отверстий в кривошипной и поршневой головках шатуна измеряли, используя специальное приспособление, оснащенное индикатором часового типа ИЧ10 ГОСТ 577-68 класса точности 0 с ценой деления 0,01 мм. Контролируемые параметры измеряли непосредственно после завершения отделочной обработки шатуна и после 45 дней его хранения (для этого использовали 25 шатунов).

Исходя из производственных условий, влияние различных способов отделочной обработки на точность формы и взаимное положение шатуна оценивали на базе выборок малого объема (25 деталей). Использование для анализа точности обработки выборок малого объема потребовало разработки специального программного обеспечения для решения основных задач статистического анализа.

Коэффициент точности определяли по уравнению

$$K_T = \frac{T}{\Delta p}, \quad (5.3)$$

где T – допуск контролируемого параметра;

Δp – практическое поле рассеяния контролируемого параметра.

Коэффициенты точности настройки (допустимый и фактический) рассчитывали по следующим уравнениям:

$$K_{\text{т.н.д}} = \frac{T - \Delta p}{2T}; \quad (5.4)$$

$$K_{\text{т.н.ф}} = \frac{\bar{X} - \Delta_0}{T}, \quad (5.5)$$

где \bar{X} – среднее арифметическое опытного распределения;

Δ_0 – координата середины поля допуска контролируемого параметра,

$$\Delta_0 = \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2}; \quad (5.6)$$

N_{\max} , N_{\min} – наибольшее и наименьшее предельные значения контролируемого параметра соответственно.

Вероятную величину исправимого и неисправимого брака определяли с помощью функции плотности распределения

$$p\{X_1 < X_i < X_2\} = \int_{X_1}^{X_2} f(X) dX, \quad (5.7)$$

где $f(X)$ – плотность распределения для выбранного закона распределения контролируемого параметра;

X_1 , X_2 – границы интервала, для которого определяется значение вероятности брака.

Для каждой операции технологической цепи связь между входной и выходной погрешностями можно описать уравнением [68]

$$\bar{Y}_v = bX + a, \quad (5.8)$$

где bX – исследуемая погрешность, показывающая, какая часть погрешности переносится на данную;

a – собственная погрешность на данной операции;

b – коэффициент переноса погрешности (при $b = 0$ – погрешность полностью исправлена; $b = 1$ – погрешность не исправлена);

X – допуск, полученный на предшествующей операции.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Результаты статистического анализа экспериментальных данных обобщены в таблице 5.5.

Результаты измерений шероховатости поверхностей после накатывания показывают, что $Ra = 0,2...0,5$ мкм, а относительная опорная длина профиля $t_{50} = 70...84$ %, что соответствует требованиям стандарта. Седлообразность поверхности отверстия шатуна при ПЦО отсутствует в отличие от хонингования.

Таблица 5.5 – Результаты анализа точности диаметральных размеров, формы и взаимного положения осей и отверстий шатунов и шероховатости поверхностей, обработанных хонингованием и пневмоцентробежным накатыванием

Контролируемый параметр	Вид обработки	Среднеарифметическое значение \bar{X} , мкм	Среднеквадратическое отклонение S , мкм	Коэффициент точности K_T	Процент брака
Диаметральный размер	Хонингование	5,88	4,26	0,86	12
	Растачивание	1,80	3,90	0,91	2
	Накатка	7,06	4,20	0,89	3
Профиль продольного сечения	Хонингование	3,00	1,70	0,67	12
	Накатка	2,20	1,32	0,92	1
Круглость отверстия	Хонингование	3,60	1,54	0,74	10
	Накатка	2,40	1,16	0,90	1,5
Параллельность осей	Хонингование	35,60	20,68	0,36	28
	Накатка	21,58	16,38	0,46	14
Перекос осей	Хонингование	33,80	24,00	0,47	16
	Накатка	33,20	16,70	0,68	4
Шероховатость поверхности	Хонингование	0,35	0,09	0,93	–
	Растачивание	0,97	0,23	0,60	–
	Накатка	0,25	0,08	0,95	–

Алмазное растачивание поверхностей отверстий шатунов с обеспечением $Ra \leq 0,63$ мкм и в 2 раза уменьшенное (по сравнению с ранее проведенными исследованиями) давление сжатого воздуха ($P_{и} \leq 0,08$ МПа) при пневмоцентробежной упрочняющей обработке позволили существенно повысить качество изготовления шатунов.

Меньшая высота исходных микронеровностей позволила осуществить их поверхностное пластическое деформирование с меньшими усилиями. В результате этого в материале детали возникают меньшие

величины остаточных напряжений, приводя к уменьшению их релаксации, наряду с уменьшением влияния и других факторов. Таким образом, наследственные связи влияют на точность обработки [54].

На основании этих данных и регрессионного анализа однофакторного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) погрешность диаметральных размеров после хонингования зависит не только от точности размеров, полученных на предшествующей операции, но и от точности самого процесса хонингования, в то время как точность диаметральных размеров после пневмоцентробежного накатывания определяется точностью размеров, полученных после алмазного растачивания. При пневмоцентробежном накатывании в результате смятия микронеровностей происходит увеличение диаметральных размеров на 5...6 мкм, поэтому координата середины поля допуска при алмазном растачивании должна быть смещена на эту же величину в сторону уменьшения размера;

2) полученные значения коэффициентов точности операций свидетельствуют о том, что пневмоцентробежное накатывание обеспечивает уменьшение отклонений профиля в продольном сечении и овальности обрабатываемых поверхностей на 10 %, а отклонение от параллельности и перекося осей на 12 % по сравнению с хонингованием;

3) после пневмоцентробежного накатывания стабильно обеспечивается шероховатость поверхности $Ra = 0,2...0,5$ мкм, относительная опорная длина профиля $t_{50} = 70...84$ %;

4) установлено влияние наследственных связей на точность обработки шатунов (величина исходной шероховатости поверхности составляла $Ra \leq 0,63$ мкм, давление сжатого воздуха, подводимого к инструменту, в пределах $P_{и} = 0,03...0,08$ МПа). Целесообразно перед алмазным растачиванием производить операцию старения шатунов для снятия остаточных напряжений.

Специализированное конструкторское бюро по двигателям средней мощности при производственном объединении Харьковский моторостроительный завод «Серп и молот» рекомендовало технологию пневмоцентробежной обработки для внедрения в серийное производство на ЗАО «Луганский завод коленчатых валов». Условием использования предлагаемой технологии является необходимость тонкого растачивания по 6-му качеству точности поверхности отверстия перед пневмоцентробежной обработкой. Это позволит повысить качество изготовления шатунов и исключить вредную для экологии операцию хонингования. Долговечность шатунов увеличится на 5 %.

Поисковые исследования режимов пневмоцентробежной обработки малой головки шатуна двигателя СМД-72 с биметаллической втулкой (номинальный диаметр – 45 мм) проведены А. П. Минаковым вместе с Н. С. Гарлачовым. Обработка проводилась двухрядным шариковым накатником (давление сжатого воздуха $P_{и} = 0,2$ МПа, подача $S = 0,3$ м/мин), каждый из рядов которого имел встречное по отношению друг к другу направление вращения. Такая схема обработки позволила создать топографию рабочей поверхности в виде ромбической сетки, положительные свойства которой известны.

После тонкого растачивания втулки шероховатость поверхности составила 1,4...1 мкм, а после пневмоцентробежной обработки $Ra \leq 0,5$ мкм. Остаточные деформации не превышают 5 мкм на диаметр. Погрешности формы в поперечном сечении соответствуют погрешностям, полученным после тонкого растачивания.

Оценка качества обработки показывает, что профилограмма поверхности отверстий втулок шатунов, прошедших эту обработку, более предпочтительна (рисунок 5.14, б), чем после традиционной обработки жестким роликовым раскатником (рисунок 5.14, в) [69–72].

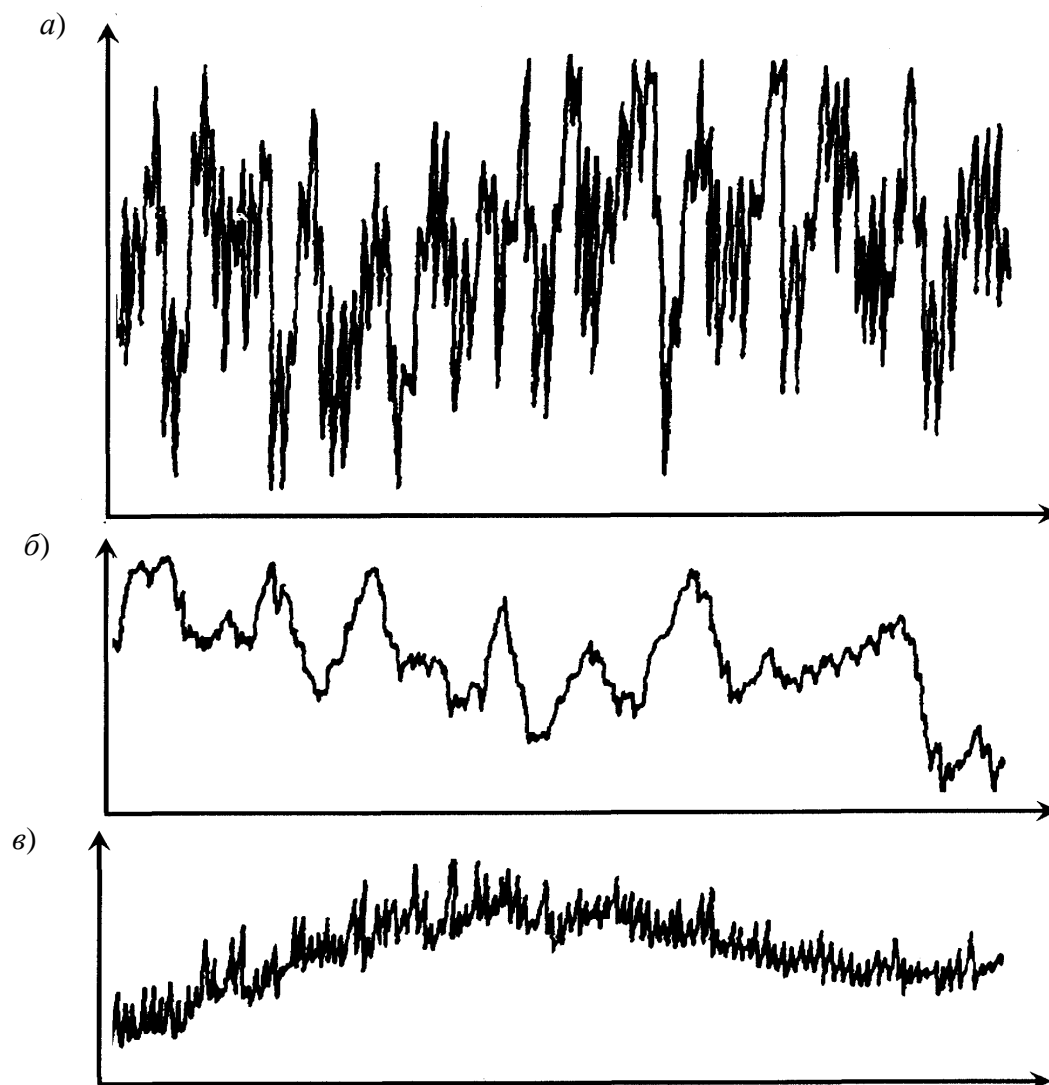
Условия работы поршневого пальца и поршневой втулки шатуна с учетом трения, значительных знакопеременных нагрузок и других факторов, по мнению авторов, требуют более совершенной по качеству поверхности втулки, чем показано на рисунке 5.14, в, где маслостойкость и контактная жесткость микрогребешков поверхности ниже, чем поверхности, полученной пневмоцентробежной обработкой (см. рисунок 5.14, б).

В 1989 г. на ЗАО «Луганский завод коленчатых валов» выполнена промышленная проверка эффективности ПВДО шатунов двигателя СМД-72 на партии заготовок (800 шт.). В результате статистического анализа установлено, что отклонения от параллельности и перекося осей отверстий в большой и малой головках шатунов в среднем на 20 % меньше, чем при их хонинговании и импульсно-ударной обработке жестким роликовым раскатником [67, 73–75]. Применение этой технологии позволило получить значительный экономический эффект со сроком окупаемости не более двух лет.

Таким образом, использование технологии финишной обработки основных отверстий шатунов позволяет повысить их долговечность, улучшить условия эксплуатации, увеличить КПД двигателя.

Обнаружено, что пневмонакатником можно обрабатывать шатуны, в отверстиях которых после алмазного растачивания остался малый припуск на хонингование (согласно действующему техпроцессу). Хонингование

поверхностей отверстий с малыми припусками на обработку приводит к неисправимому браку шатунов.



a – после тонкого растачивания; *б* – после пневмоцентробежной обработки; *в* – после традиционной обработки жестким роликовым раскатником (все профилограммы записаны в одном масштабе)

Рисунок 5.14 – Профилограммы поверхностей

В отличие от хонингования после ПВДО не наблюдалось появления конусности, седлообразности отверстия. Стабильно обеспечивалась шероховатость поверхности $Ra = 0,5...0,6$ мкм, что не всегда достигалось хонингованием. После обработки шатунов заметного износа ни деформирующих шаров, ни дисков корпуса инструмента не обнаружено.

5.4 Пневмоцентробежная обработка алюминиевых втулок

В [75] представлены результаты исследований влияния режимов пневмоцентробежной обработки на качество внутренних цилиндрических поверхностей алюминиевых втулок номинальным диаметром 23 мм. Обработка осуществлялась накатником [76] на токарно-винторезном станке мод. 16К20 при давлении сжатого воздуха $P_{и} = 0,15$ МПа, диаметре шаров $d_{ш} = 5$ мм и исходной шероховатости $Ra_{исх} = 4,7...5$ мкм. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи представлена на рисунке 5.15.

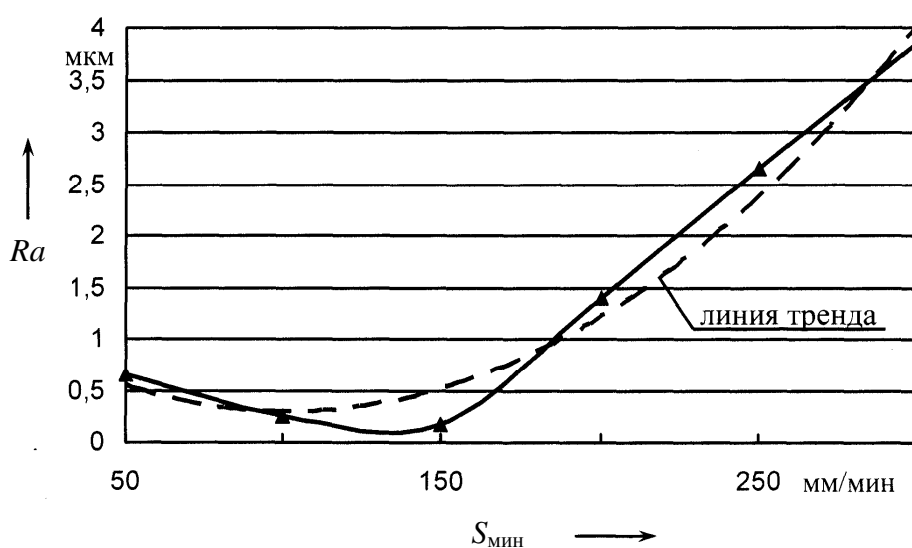
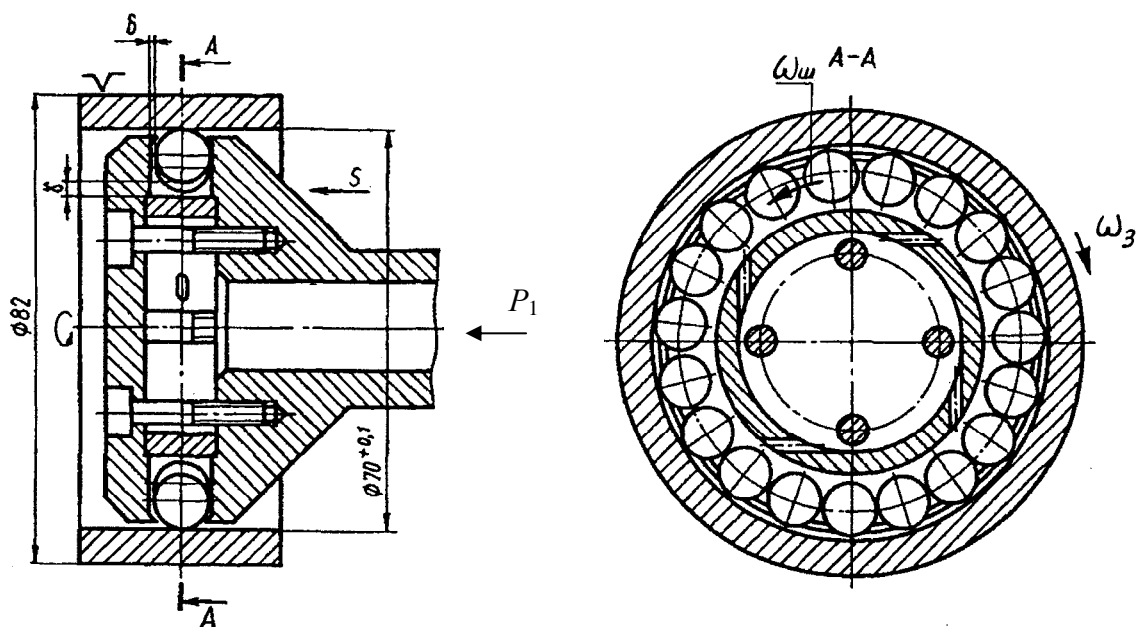


Рисунок 5.15 – Влияние подачи инструмента S на шероховатость раскатанной поверхности Ra при давлении сжатого воздуха $P_{и} = 0,15$ МПа

6 Исследование пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей, внутренних и наружных цилиндрических поверхностей с вращением заготовки

6.1 Влияние конструктивных параметров инструмента на шероховатость обработанной поверхности

Влияние диаметра деформирующих шаров. Исследования проводились для пневмонакатника (рисунок 6.1), где применялись деформирующие шары диаметром $d_{ш}$, равным 8; 10,25; 12,7; 16,78; 18,3 и 19,84 мм. Диаметры сопел d_c составляли 2; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 мм, количество сопел $z_c = 4$. В качестве обрабатываемого материала использовали различные марки конструкционных сталей: сталь 35, 45, 40X и др. Внутренний диаметр (номинальный) обрабатываемых заготовок принимали равным 80 мм. Исходная шероховатость поверхности под раскатывание находилась в пределах $Ra = 2,50...1,25$ мкм. Исследования проводили при следующих режимах обработки: давление сжатого воздуха $P_1 = 0,1...0,6$ МПа; подача инструмента $S = 0,07...1$ мм/об; частота вращения $n = 12,5...2000$ мин⁻¹.



P_1 – давление сжатого воздуха в пневмосистеме перед инструментом, МПа; S – подача инструмента, мм/об; $\omega_{ш}$ – угловая скорость вращения шаров, рад/с; $\omega_з$ – угловая скорость вращения заготовки, рад/с

Рисунок 6.1 – Инструмент для пневмоцентробежной обработки заготовок

Усредненные оптимальные результаты получены для инструмента с $d_{ш} = 12,7$ мм, $d_c = 3$ мм, $z_c = 4$. В зависимости от указанных режимов достигается снижение шероховатости обрабатываемой поверхности с 2...1,6 до 1...0,2 мкм.

Жесткость обрабатываемой заготовки, косвенно определяемой толщиной стенки стальной втулки, влияет на выбор диаметра деформирующего шара при сохранении качества точности после обработки. Каждая втулка (материал обрабатываемых втулок – сталь 45 с твердостью 192...197 НВ) (рисунок 6.2) крепилась в трехкулачковом патроне токарно-винторезного станка мод. 1К62. Токарной обработкой получали заданную толщину стенки t_n втулки на длине 80 мм, затем, не снимая ее со станка, осуществляли накатывание поверхности. Исходные параметры процесса обработки: шероховатость поверхности $Ra = 2,6...2$ мкм; давление сжатого воздуха $P_1 = 0,4...0,5$ МПа; частота вращения детали $n = 1000$ мин⁻¹; подача инструмента $S = 0,07$ мм/об.

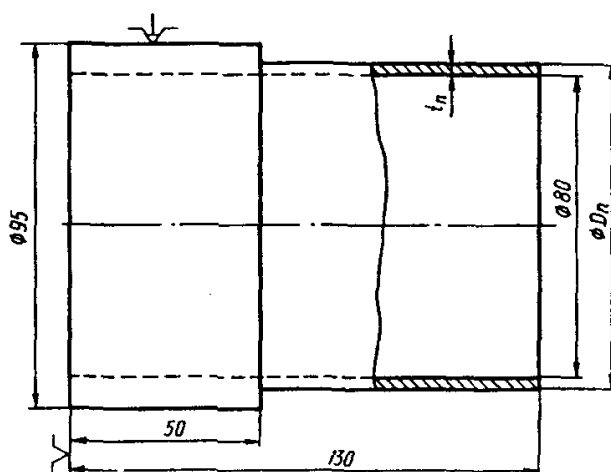


Рисунок 6.2 – Схема закрепления тонкостенной заготовки

Цель эксперимента – подбор диаметра деформирующих шаров инструмента (8; 10,25; 12,72; 18,3) применительно к точному размеру втулки диаметром 80Н7, полученному растачиванием с обеспечением шероховатости поверхности после накатывания 0,32...0,16 мкм при соответствующей толщине стенки втулки t_n .

Кривая на рисунке 6.3 показывает, что с увеличением массы шара толщина стенки должна быть большей для обеспечения необходимой макрогеометрии детали. Наглядно представлены возможности процесса обработки применительно к мало жестким деталям. Следует отметить, что

накатывание внутренней поверхности каждой заготовки проводилось с помощью одной и той же схемы их базирования и закрепления (см. рисунок 6.2). Изменение величины поля допуска на диаметр 80 мм для партии втулок составляло в среднем 0,01 мм после ПЦО.

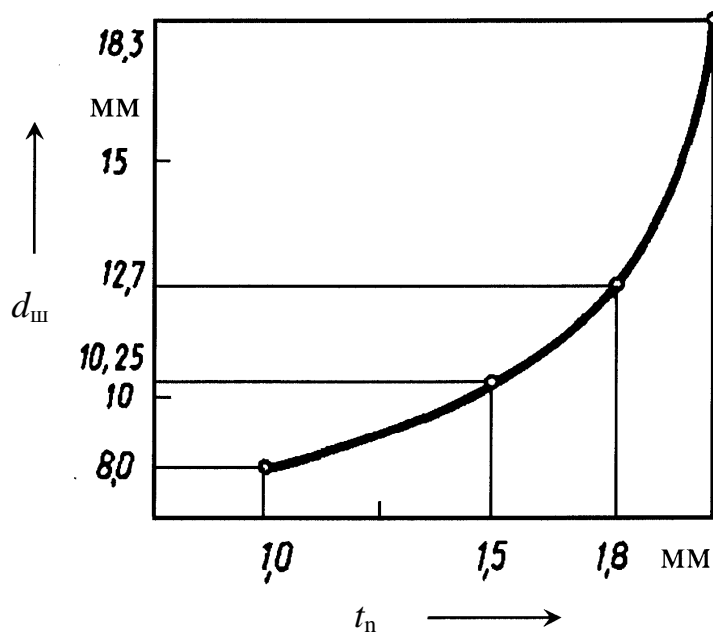


Рисунок 6.3 – Влияние толщины стенки заготовки на выбор диаметра деформирующего шара

В процессе обработки остаточная деформация заготовки после накатывания зависела в основном от механических свойств материала и ее жесткости. При закреплении заготовки, например, по наружной поверхности, когда силы зажима расположены аппозитивно в одной плоскости с силами, определяющими процесс пластического деформирования материала, но имеют встречное друг другу направление, остаточная деформация заготовки будет меньше. Более того, влияние упругих сил стенки заготовки может снижаться за счет равномерно распределенных сил зажима по всей ее поверхности. Технологические возможности упрочняющей обработки маложестких деталей можно расширить.

Влияние материала дисков накатника. Как видно из рисунка 6.1, боковые поверхности двух дисков накатника образуют стенки камеры расширения корпуса инструмента. В процессе движения инструмента в осевом направлении деформирующие шары скользят по поверхности

дисков, поэтому состояние поверхности дисков и характеристики материала существенно влияют на характер движения шаров, расположенных в камере расширения корпуса инструмента, определяя производительность процесса обработки и характеристику микрорельефа обработанной поверхности.

Влияние материала дисков на характер движения деформирующих шаров рассматривалось с учетом осевого δ и радиального γ зазоров шаров в инструменте.

Исследовались инструменты, диски накатников которых выполнены из стали У8А с твердостью 46,5...51,5 и 55,4...61 HRC, стали 45 с твердостью 46,5...51,5 HRC, стали ШХ15 с твердостью 46,5...51,5 и 55,4...61 HRC. При обработке конструкционных сталей в состоянии поставки приемлемое значение осевого зазора деформирующих шаров находится в пределах $\delta = 0,02...0,08$ мм. Высокая производительность и качество обработанных поверхностей получены при использовании накатника, диски которого выполнены из жесткого капрона ($d_{ш} = 19,84$ мм; $z_{ш} = 9$; $d_c = 5$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,01...0,15$ мм; $d_{ш} = 16,78$ мм; $z_{ш} = 10$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,01...0,18$ мм). Преимущество такого накатника заключается в том, что почти отсутствует износ шаров о стенки дисков. Коэффициент трения скольжения стальных шаров о стенки из жесткого капрона весьма мал по сравнению с коэффициентом трения скольжения стальных шаров о стенки из стали, поэтому резко увеличивается частота орбитального вращения шаров и интенсифицируется процесс обработки. Недостатком такой конструкции является низкая стойкость материала дисков раскатника. Если зазор деформирующих шаров составляет $\delta = 0,01...0,10$ мм, то в случае применения стальных шайб происходит интенсивный износ шаров в результате трения о поверхности дисков. При $\delta > 0,10$ интенсивность их износа снижается.

На рисунках 6.4 и 6.5 представлены зависимости $Ra = f(S)$ и $Ra = f(n)$ в процессе раскатывания внутренней поверхности цилиндра диаметром 82 мм, полученной предварительным растачиванием резцом Т15К6 при $n = 630$ мин⁻¹ и $S = 0,07$ мм/об (материал заготовки – сталь 45 с твердостью 30 HRC). Параметры накатника: $d_{ш} = 12,7$ мм; $z_{ш} = 16$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,1$ мм; $\gamma = 3$ мм. Обработка поверхности осуществлялась при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,4...0,5$ МПа, подаче $S = 0,07...1$ мм/об, частоте вращения $n = 100...2000$ мин⁻¹, количестве проходов инструмента, равном 2.

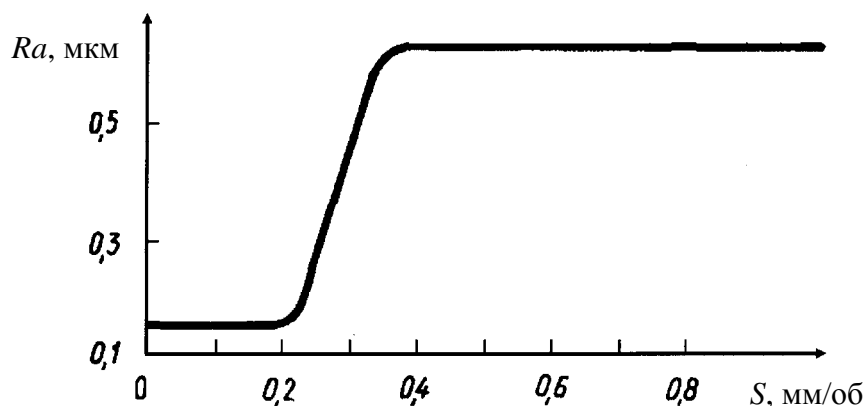


Рисунок 6.4 – Влияние режимов процесса обработки на шероховатость накатанной поверхности $Ra = f(S)$

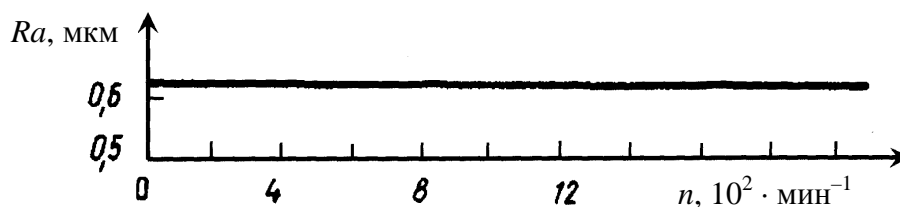


Рисунок 6.5 – Влияние режимов процесса обработки на шероховатость накатанной поверхности $Ra = f(n)$

Согласно анализу графиков, частота вращения заготовки для конкретных условий обработки на шероховатость поверхности влияния не оказывает. При раскатывании на шероховатость существенно влияет величина подачи.

Наименьшая шероховатость поверхности для улучшенных и закаленных сталей при наибольшей производительности процесса отмечена при следующих параметрах: $d_{ш} = 12,72$ мм; $z_{ш} = 16$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta \leq 0,5$ мм; $\gamma = 10...12$ мм (материал дисков – сталь ШХ15 с твердостью 46,5...51,5 HRC и шероховатостью $Ra = 0,32...0,16$ мкм).

Исследования и оптимизация процесса обработки показали, что при обработке сталей средней твердости малые осевые зазоры δ деформирующих шаров, характерные для накатывания сталей в состоянии поставки, не обеспечивают получения приемлемых результатов. С увеличением δ от 0,2 до 0,5 мм создаются оптимальные условия

обработки. Объясняется это тем, что с увеличением δ повышается осевая «игра» шаров, что способствует интенсификации процесса обработки.

Необходимость увеличения радиального зазора в инструменте, особенно при обработке закаленных сталей, объясняется следующими факторами. Во-первых, при упрочнении закаленных сталей шары, пересекая струю сжатого воздуха, выходящую из сопла, отбрасываются к обрабатываемой поверхности, а выйдя из зоны действия струи, отскакивают от поверхности обработки на значительное расстояние к оси инструмента, ударяя (если зазор γ мал) по основанию камеры расширения. В таких случаях необходимо увеличить зазор γ . Во-вторых, даже при отсутствии значительного отскока деформирующего шара от обрабатываемой поверхности малое значение γ снижает производительность процесса обработки, поэтому необходимо создать под каждым шаром воздушную подушку, которая обеспечивает эффект автоколебательного движения деформирующих шаров в процессе обработки, значительно снижая величину усилия для осуществления процесса ППД.

Влияние конструкции камеры расширения. Эксперименты проводились с использованием накатника (см. рисунок 6.1) с конструктивными параметрами: $d_{ш} = 12,7$ мм; $z_{ш} = 16$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,3$ мм; $\gamma = 3$ мм; материал цилиндра – сталь 45 в состоянии поставки; $D_{вн} = 80$ мм; $D_{н} = 100$ мм; длина 150 мм. Шероховатость исходной поверхности под накатывание $Ra = 2,5$ мкм.

Цель эксперимента – определение влияния динамических характеристик рабочей полости камеры на качество обработанной поверхности. Для достижения цели на боковых стенках дисков накатника были просверлены четыре отверстия диаметром 5 мм. Это создало условия для дополнительного выхода отработавшего воздуха в атмосферу. Оказалось, что при таких конструктивных особенностях камеры расширения шероховатость поверхности существенно не снижается, несмотря на то что обработка осуществляется при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,55$ МПа, частоте вращения заготовки $n = 500 \dots 2000$ мин⁻¹ и подаче $S = 0,07 \dots 0,5$ мм/об. Шероховатость поверхности Ra после обработки снизилась с 0,8 до 0,4 мкм. Существенное уменьшение наружного диаметра боковых дисков накатника для снижения сопротивления выводу отработавшей среды не дало положительных результатов. Таким образом, аэродинамические характеристики воздушного потока, обусловленные конструкцией камеры расширения, значительно влияют на процесс пневмоцентробежной упрочняющей обработки.

Влияние размера осевого канала инструмента. Размер осевого канала d_0 влияет на величину подводимого к деформирующим шарам давления (в камеру расширения) и, кроме того, во многом определяет работоспособность инструмента. Расход сжатого воздуха характеризует мощность, развиваемую деформирующими шарами в процессе обработки. Чем меньше затраченная шарами энергия, тем ниже их производительность, отнесенная на единицу длины раскатанной цилиндрической поверхности. Так, например, упрочнением внутренней цилиндрической поверхности заготовки из стали 45 с $D_{\text{вн}} = 80$ мм при исходной шероховатости поверхности $Ra = 2,5$ мкм и режимах $n = 500 \dots 1200$ мин⁻¹, $S = 0,07$ мм/об при $d_0 = 10$ мм достигалась шероховатость поверхности $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм.

После того как осевой канал инструмента d_0 и внутренний диаметр шланга были увеличены до 20 мм, стало возможным упрочнение поверхности деталей не только из термически необработанных сталей, но и из сталей твердостью до 46,5...51,5 HRC с достижением шероховатости $Ra = 1,25 \dots 0,05$ мкм.

6.2 Влияние режимов обработки на шероховатость упрочненной поверхности

Влияние скорости вращения заготовки и подачи инструмента. Исследования проводились на токарно-винторезном станке мод. 1К62 пневмонакатником (см. поз. 501 в таблице 4.5) с конструктивными параметрами: $d_{\text{ш}} = 18,25$ мм; $z_{\text{ш}} = 10$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $d_0 = 20$ мм; $\delta = 0,03$ мм; $\gamma = 2$ мм.

Для оценки шероховатости поверхности применяли профилометр мод. 253. Обработке подвергались заготовки из стали 35 (185...189 HB), а также из сталей 40, 45, 15, 20X, 40X и др. в состоянии поставки.

Внутренний диаметр заготовки из стали 35 растачивался резцом, оснащенным пластинкой твердого сплава Т15К6, при $n = 1000$ мин⁻¹, $S = 0,07$ мм/об. При этом соблюдались условия, предъявляемые к поверхности, подлежащей обработке методом ППД: отсутствие на поверхности заготовки шелушения, вырывов, задиров и др. В результате растачивания шероховатость поверхности составила $Rz = 20 \dots 10$ мкм.

На рисунке 6.6 представлена диаграмма зависимости шероховатости упрочненной поверхности заготовки от режимов обработки. При исследовании принимали встречное направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой поверхности.

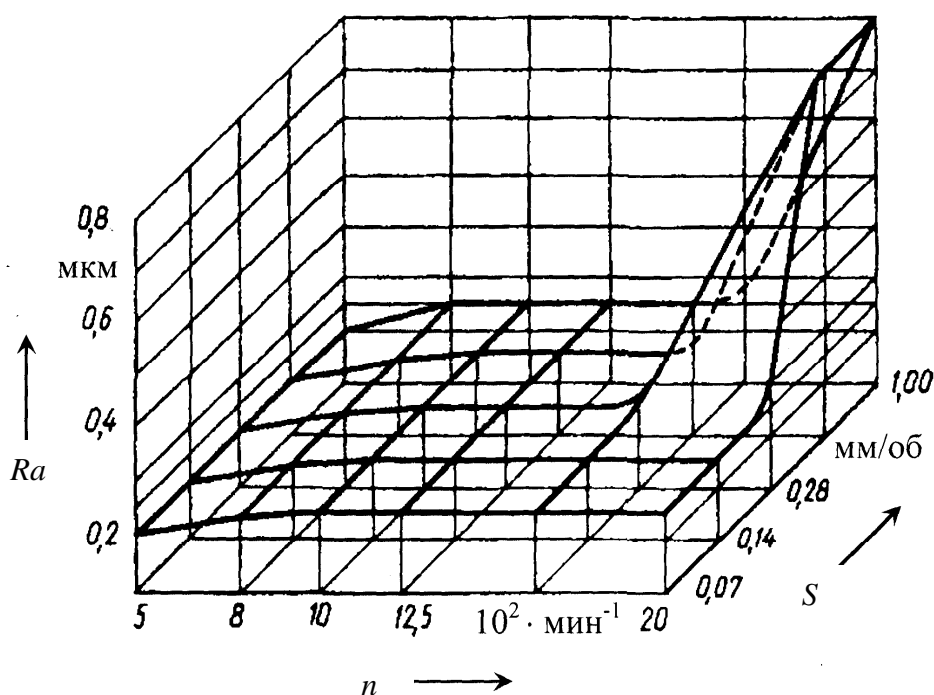


Рисунок 6.6 – Влияние частоты вращения заготовки n и подачи S на шероховатость накатанной поверхности при давлении сжатого воздуха в пневмосети цеха $P_1 = 0,65...0,7$ МПа и числе проходов $i = 1$

Согласно графику, раскатыванием обеспечивается снижение шероховатости с $Ra = 0,8$ до $Ra = 0,25$ мкм. Увеличение числа проходов инструментом до $i = 2$ на прежних режимах обеспечивает получение шероховатости поверхности $Ra = 0,32...0,20$ мкм. Величина остаточной деформации материала наклепанного слоя составила $0,012...0,015$ мм. Исследования показали, что подача инструмента и частота вращения детали до определенных пределов не оказывают существенного влияния на высотные характеристики микронеровностей раскатанной поверхности.

Влияние твердости материала. Эксперименты проводились на заготовках из стали ХВГ с твердостью $27...32$ HRC, внутренний диаметр которых составлял 80Н7, наружный – 92 мм, длина заготовки – 40 мм. Внутренний диаметр получен растачиванием резцом из эльбора-Р (режимы резания: $n = 630$ мин⁻¹; $S = 0,07$ мм/об). Шероховатость поверхности после растачивания $Ra = 2,5...2,0$ мкм. Конструктивные параметры раскатника: $d_{ш} = 10,25$ мм; $z_{ш} = 30$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,03$ мм; $\gamma = 2$ мм; $d_0 = 20$ мм.

На диаграмме, построенной по результатам экспериментов (рисунок 6.7), видно, что значение шероховатости поверхности Ra уменьшается с $0,4$ до $0,2$ мкм в диапазоне $n = 125...2000$ мин⁻¹ и

$S = 0,07...1$ мм/об. При этом давление сжатого воздуха P_1 составляло $0,65...0,7$ МПа, число проходов равнялось 2.

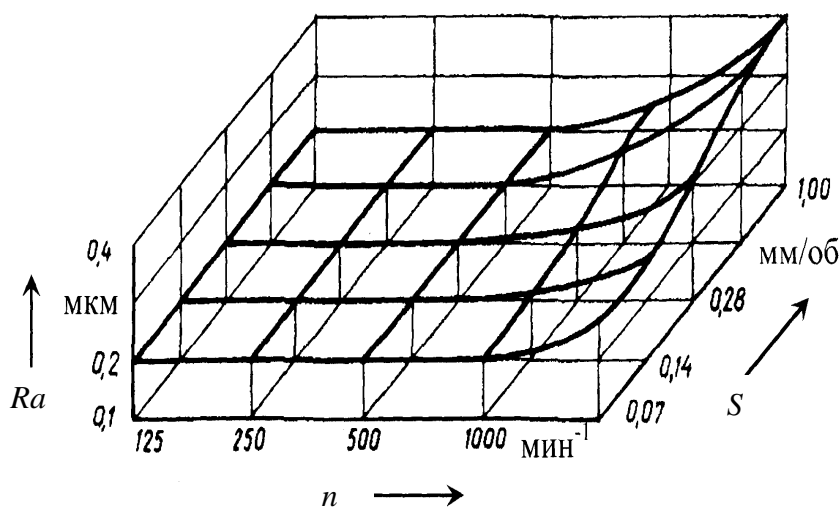


Рисунок 6.7 – Влияние материала средней твердости и режимов процесса обработки на шероховатость накатанной поверхности

Внутренний диаметр после ПВДО (остаточная деформация) увеличился на $0,01$ мм. Шероховатость поверхности $Ra = 0,2$ мкм достигалась во всем диапазоне подач, $S = 0,07...1$ мм/об при $n = 125...500$ мин⁻¹.

Влияние режимов обработки n и S на шероховатость накатанной поверхности для стали ХВГ с твердостью $39,5...41,5$ HRC представлено на рисунке 6.8. Обрабатываемые детали имели номинальный внутренний диаметр 80 мм, наружный – 92 мм и длину (высоту цилиндра) 40 мм. Внутренние поверхности заготовок накатывались при следующих режимах: частота вращения $n = 12,5...250$ мин⁻¹; подача $S = 0,07...0,57$ мм/об. Давление сжатого воздуха $P_1 = 0,65...0,7$ МПа. Измерения показали, что при исходной шероховатости $Ra = 1...1,6$ мкм накатыванием обеспечивается шероховатость $Ra = 0,25...0,05$ мкм при числе проходов инструмента, равном 2.

На рисунке 6.9 отражено влияние режимов обработки на шероховатость обработанной поверхности из стали 45 с твердостью $41,5...46,5$ HRC.

Условия эксперимента: номинальный внутренний диаметр втулок 80 мм, наружный – 92 мм, длина 40 мм (исходная шероховатость поверхности $Ra = 2,5...1,25$ мкм). Параметры инструмента: $d_{ш} = 12,7$ мм; $z_{ш} = 16$; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,5$ мм; $\gamma = 5$ мм. Режимы процесса обработки:

частота вращения $n = 100 \dots 1600 \text{ мин}^{-1}$; подача $S = 0,07 \dots 0,57 \text{ мм/об}$; число проходов инструмента равнялось 1.

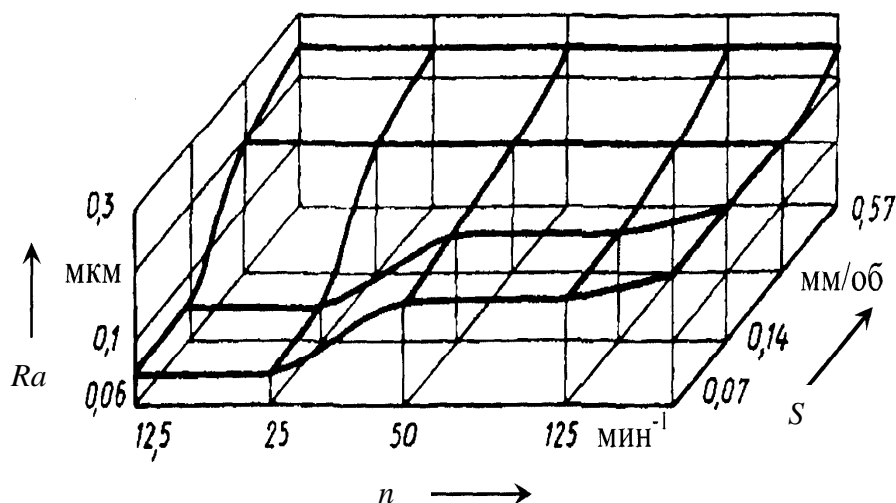


Рисунок 6.8 – Влияние частоты вращения заготовки n и подачи инструмента S на шероховатость накатанной поверхности Ra при параметрах (исходная шероховатость $Ra = 1,0 \dots 1,6 \text{ мкм}$; давление сжатого воздуха $P_1 = 0,65 \dots 0,7 \text{ МПа}$; число проходов инструмента $i = 1$ (обрабатываемый материал – сталь ХВГ с твердостью $39,5 \dots 41,5 \text{ HRC}$))

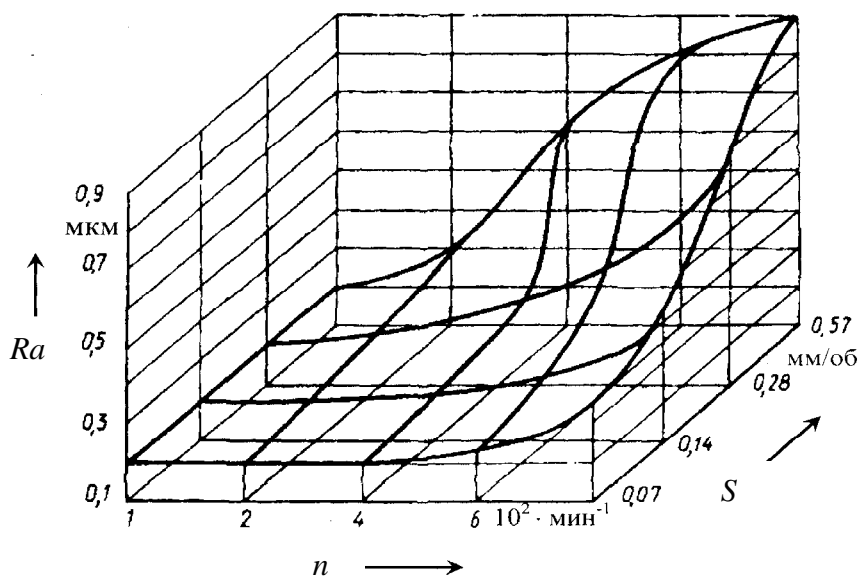


Рисунок 6.9 – Влияние частоты вращения заготовки n и подачи инструмента S на шероховатость накатанной поверхности Ra при постоянных параметрах (исходная шероховатость $Ra = 2,5 \text{ мкм}$; давление сжатого воздуха $P_1 = 0,65 \dots 0,7 \text{ МПа}$; число проходов инструмента $i = 1$ (обрабатываемый материал – сталь 45 с твердостью $41,5 \dots 46,5 \text{ HRC}$))

После накатывания исходная шероховатость поверхности Ra снизилась до 0,2 мкм. Повышение частоты вращения от 800 до 1600 мин⁻¹ и подачи от 0,28 до 0,57 мм/об приводит к увеличению шероховатости поверхности до 0,9 мкм. Затем в этом же инструменте вместо деформирующих шаров $d_{ш} = 12,7$ мм в камеру расширения корпуса были помещены шары $d_{ш} = 8$ мм, использование которых не дало лучших результатов.

Выполненные исследования показали, что необходимо применять при упрочнении закаленных материалов шары большей массы.

Кроме того, исследовалась возможность обработки сталей с твердостью 49...51 HRC (материал втулок – сталь ХВГ). Размеры те же, что и в эксперименте для деталей из стали 45 с твердостью 41,5...46,5 HRC. Применялся тот же инструмент. Постоянные параметры: исходная шероховатость поверхности $Ra = 1,6...1,3$ мкм; давление сжатого воздуха $P = 0,7$ МПа; число проходов инструмента равнялось 1. Режимы процесса пневмоцентробежной обработки: частота вращения $n = 12,5...500$ мин⁻¹; подача $S = 0,07...0,57$ мм/об. Согласно исследованиям, при частоте вращения $n = 12,5...25$ мин⁻¹ и подаче $S = 0,07...0,14$ мм/об шероховатость снижается с 0,32 до 0,2 мкм. При остальных режимах наблюдается ее увеличение до 0,8...0,4 мкм.

Влияние смазки. В экспериментах исследовали смазочно-охлаждающие жидкости различных марок: сульфифрезол, масло машинное и др. В общем случае интенсивность сглаживания микронеровностей исходной поверхности снижается. При использовании масел шероховатость несколько выше, чем при раскатывании без смазки. Это объясняется тем, что эффект сглаживания неровностей уменьшается. В отдельных случаях применение масел способствует устранению волнистости поверхности. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования соотношений применяемости масла и сжатого воздуха.

Исследование обрабатываемости малопластичных материалов. Исследованию подвергались заготовки из конструкционных сталей (сталь 45, 40Х, 18ХГТ). Твердость материала составляла 45,1...51,0 HRC, а для цементируемой стали 18ХГТ – 51...57 HRC. Втулки из стали 45 и 40Х имели номинальный внутренний диаметр 82 мм, втулки из стали 18ХГТ – 61 мм. Внутреннюю поверхность втулок шлифовали до получения шероховатости $Ra = 0,63...0,40$ мкм.

Пневмоцентробежную обработку выполняли на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Втулки, длина которых менее 105 мм (сталь 45 и 40Х), обрабатывали инструментом со следующими параметрами:

$d_{ш} = 12,7$ мм; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,5$ мм; $\gamma = 3,5$ мм; $d_0 = 20$ мм (материал шаров – сталь ШХ15; материал дисков инструмента – капрон). Режимы обработки: частота вращения заготовки $n = 500$ мин⁻¹; давление сжатого воздуха $P = 0,7$ МПа; подача инструмента $S = 0,1$ мм/об. Однопроходной обработкой обеспечивалась шероховатость поверхности в пределах $Ra = 0,32...0,16$ мкм. Внутреннюю поверхность втулок, твердость которых составляла 50...56 HRC, обрабатывали инструментом, диаметр которого $d_{ш} = 9$ мм, шары были выполнены из вольфрамокарбида твердостью 89...91 HRA. Режимы обработки: $n = 500$ мин⁻¹; $S = 0,05$ мм/об; $P_1 = 0,65...0,70$ МПа; количество ходов инструмента – 1; шероховатость поверхности после обработки $Ra = 0,2...0,16$ мкм.

Таким образом, как и при известных методах ППД, например при алмазном выглаживании поверхности деталей каленых материалов, шероховатость поверхности после пневмоцентробежной обработки снижается не более чем в 2...4 раза.

Обработку гильз двигателя СМД-14, изготовленных из специального легированного чугуна, выполняли накатником с наклонной камерой расширения ($\alpha = 5^\circ$). Параметры инструмента: $d_{ш} = 12,7$ мм; $d_c = 3$ мм; $z_c = 4$; $d_0 = 20$ мм; $\delta = 0,5$ мм. Исходная шероховатость гильзы после чистового растачивания $Ra = 1,25$ мкм. Затем, минуя процесс хонингования, осуществляли раскатывание цилиндра гильзы. Режимы обработки: $P_1 = 0,5$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; $S = 0,1$ мм/об; количество проходов инструмента – 1; шероховатость поверхности после раскатывания $Ra = 0,63...0,32$ мкм.

Стендовые испытания гильз ДВС, проведенные ранее в лаборатории тракторных и комбайновых двигателей Харьковского политехнического института, прошедшие финишную операцию растачивания, показали повышенный угар масла вследствие волнистости поверхности после растачивания.

Особенность упрочняющей обработки чугуновых деталей состоит в том, что вследствие хрупкости материала верхняя часть поверхности как наименее прочная под «ударами» деформирующих шаров скалывается и уносится из зоны обработки мощным потоком сжатого воздуха. Таким образом, обрабатывается только «надежный» слой металла. С течением времени деформирующие шары покрываются налетом графита, что вызывает необходимость его удаления из-за ухудшения эффекта деформируемости микрогребешков обрабатываемой поверхности.

Результаты оптимизации режимов обработки и конструктивных параметров инструмента. В процессе исследований установлено, что

при пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработке внутренних цилиндрических поверхностей заготовок из сталей в состоянии поставки (стали 20, 45, 40X) возможна производительная обработка при использовании подводимого к инструменту давления сжатого воздуха $P_1 \leq 0,7$ МПа. Однако иногда в процессе обработки возникает волнистость поверхности, которую необходимо уменьшить до значений, указанных в технических условиях чертежа детали. Эту техническую задачу можно решить при работе инструмента с использованием малых давлений сжатого воздуха в пределах $P_1 = 0,1 \dots 0,4$ МПа.

Для проведения экспериментальных исследований применена схема инструмента (см. рисунок 6.1). Основные конструктивные параметры: диаметр сопла d_c , мм; число сопел z_c ; радиальный и осевой зазоры деформирующего шара γ , δ , мм; частота вращения детали n , мин⁻¹; давление сжатого воздуха в системе $P_{и}$, МПа. Постоянные параметры: $d_{ш} = 10$ мм; $z_{ш} = 16$ шт. (материал обрабатываемых заготовок – сталь 20 в состоянии поставки и сталь 40X, твердость 30...40 и 50...55 HRC соответственно).

Эксперименты проводили по методике последовательного симплекс-планирования [145], т. е. по начальной матрице. Сравнивали результаты первой серии опытов и выбирали худший из них [146]. Вычисляли параметры последующего опыта и далее до получения лучшего результата эксперимента. Лучший результат ($Ra = 0,45$ мкм) получен после девяти экспериментов при $d_c = 2,5$ мм; $z_c = 4$; $\delta = 0,05$ мм; $\gamma = 3$ мм; $P_{и} = 0,1$ МПа; $S = 0,05$ мм/об; $n = 315$ мин⁻¹.

Установлено, что пневмоцентробежным раскатыванием достигается значительное снижение шероховатости поверхности цилиндров: для стали 20 – с 6,3...3,2 до 0,8...0,4 мкм, стали 40X (30...40 HRC) – с 1,6...0,8 до 0,4...0,2 мкм и стали 40X (50...55 HRC) – с 0,8...0,4 до 0,1...0,05 мкм.

Моделирование процесса обработки. С целью исследования влияния давления сжатого воздуха и конструктивных параметров элементов пневмоцентробежного инструмента, т. е. диаметра сопел, шаров, осевого зазора между дисками и шарами, на качество обработанной поверхности был проведен полнофакторный эксперимент. В качестве параметра оптимизации выбрано среднеквадратическое значение крутизны профиля. Установлено, что показатель шероховатости поверхности Ra в недостаточной степени характеризует технологические возможности инструмента, т. е. Ra имеет одинаковое значение при обработке поверхности инструментом с различными конструктивными исполнениями, среднеквадратическое значение крутизны профиля и другие параметры различны.

Обработка внутренних цилиндрических поверхностей заготовок колец (материал – сталь 45 с твердостью 170...180 *HB*), имевших номинальный диаметр 65 мм, производилась на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Режимы процесса обработки: частота вращения заготовки – 200 мин⁻¹, подача инструмента – 0,7 мм/об.

Верхний уровень диаметра сопел X_1 составлял 1,5 мм, нижний – 3,5 мм. Уровни выбирались на основании предварительных экспериментальных данных.

Верхний уровень диаметра шаров X_2 составлял 12,7 мм, нижний – 7,4 мм. Верхний уровень осевого зазора δ между торцами дисков и деформирующими шарами X_4 равен 0,1 мм, нижний – 1,2 мм. Верхний уровень давления воздуха в осевой полости инструмента X_3 – 0,3 МПа, нижний – 0,1 МПа.

Измерение параметров шероховатости поверхности и других выполнялось с помощью прибора TALYSURF 5M на ОАО «Минский подшипниковый завод».

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение $Y = 0,183 - 0,093X_1 - 0,034X_2 - 0,045X_3 - 0,017X_4$.

Согласно анализу, модель адекватна и все коэффициенты значимы, т. к. они больше доверительного интервала, равного 0,01.

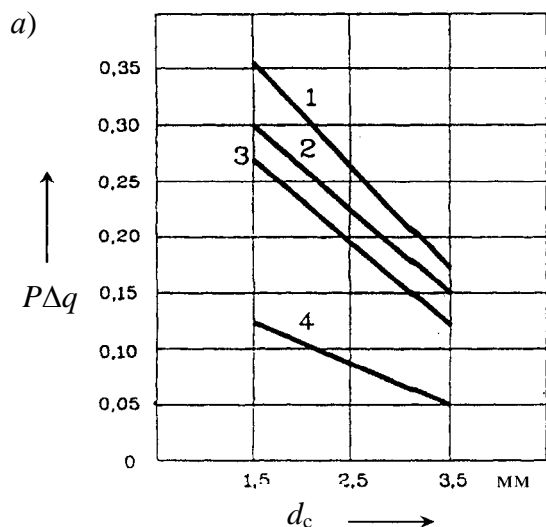
Наибольшее влияние на крутизну профиля оказывает диаметр сопел, в 2 раза меньшее влияние оказывает диаметр деформирующих шаров.

Анализ профилограмм показал, что исходные микронеровности на обрабатываемой поверхности деформируются в меньшей степени шарами большего диаметра, т. е. происходит неполное смятие неровностей, поэтому и крутизна профиля больше, чем при обработке шарами меньшего диаметра.

При обработке поверхности шарами диаметром 7,9 мм происходит не только полное смятие исходных микронеровностей, но образуется новый волнистый профиль, крутизна профиля которого меньше. С уменьшением диаметра шаров уменьшается и площадь их контакта с деформируемой поверхностью, в результате чего увеличивается удельное давление на нее и неровности полностью сминаются.

Осевой зазор δ между дисками и деформирующими шарами оказывает наименьшее влияние на изменение крутизны профиля.

Графики зависимости крутизны профиля от исследуемых параметров представлены на рисунке 6.10.

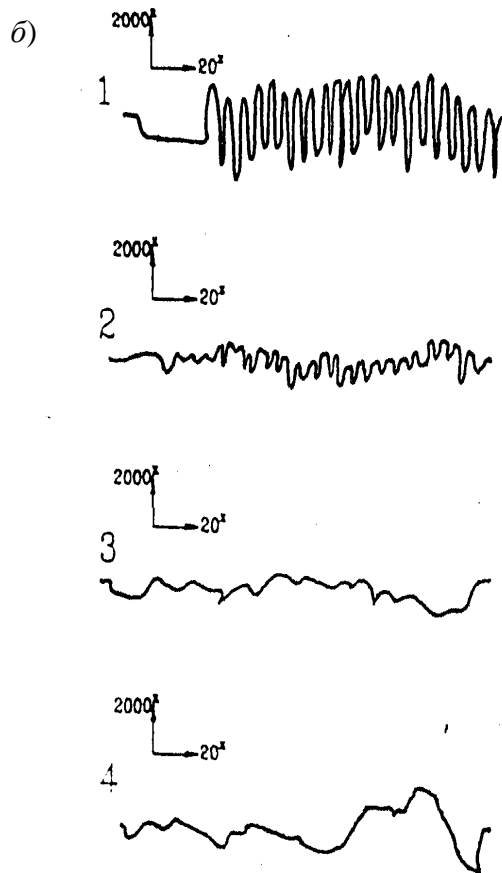


1 – для $d_{ш} = 12,7$ мм; $P_1 = 0,1$ МПа; $\delta = 1,2$ мм

2 – для $d_{ш} = 12,7$ мм; $P_1 = 0,3$ МПа; $\delta = 1,2$ мм

3 – для $d_{ш} = 7,9$ мм; $P_1 = 0,1$ МПа; $\delta = 1,2$ мм

4 – для $d_{ш} = 7,9$ мм; $P_1 = 0,3$ МПа; $\delta = 1,2$ мм



Конструктивные параметры инструмента: $d_c = 1,5$ мм; $d_{ш} = 7,9$ мм. Режимы процесса обработки: $P_1 = 0,1$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; $S = 0,7$ мм/об. Исходная шероховатость поверхности $Ra = 3,69$ мм. Конечная шероховатость поверхности $Ra = 3,32$ мм. $P\Delta q = 0,268$. Количество выступов профиля над средней линией – 10

Конструктивные параметры инструмента: $d_c = 1,5$ мм; $d_{ш} = 7,9$ мм. Режимы процесса обработки: $P_1 = 0,3$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; $S = 0,7$ мм/об. Исходная шероховатость поверхности $Ra = 3,5$ мм. Конечная шероховатость поверхности $Ra = 1,088$ мм. $P\Delta q = 0,126$. Количество выступов профиля над средней линией – 17

Конструктивные параметры инструмента: $d_c = 3,5$ мм; $d_{ш} = 7,9$ мм. Режимы процесса обработки: $P_1 = 0,1$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; $S = 0,7$ мм/об. Исходная шероховатость поверхности $Ra = 3,8$ мм. Конечная шероховатость поверхности $Ra = 0,611$ мм. $P\Delta q = 0,063$. Количество выступов профиля над средней линией – 6

Конструктивные параметры инструмента: $d_c = 3,5$ мм; $d_{ш} = 7,9$ мм. Режимы процесса обработки: $P_1 = 0,3$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; $S = 0,7$ мм/об. Исходная шероховатость поверхности $Ra = 4,01$ мм. Конечная шероховатость поверхности $Ra = 1,583$ мм. $P\Delta q = 0,038$. Количество выступов профиля над средней линией – 2

Материал втулок – сталь 45

Номинальный внутренний диаметр заготовки – 65 мм, наружный – 88 мм

a – зависимость крутизны профиля $P\Delta q$ обмеряемой поверхности от диаметра сопел d_c ;
б – профилограммы накатанных поверхностей заготовок

Рисунок 6.10 – Влияние конструктивных параметров инструмента на качество поверхности после пневмоцентробежной обработки

Выводы:

1) наибольшее смятие неровностей и образование волнистости на обрабатываемой поверхности происходит при использовании инструмента с соплами диаметром 3,5 мм и выполняющими наибольшую работу при деформировании поверхности шарами диаметром 7,9 мм, следовательно, данные конструктивные параметры можно рекомендовать и при обработке закаленных заготовок деталей;

2) при обработке незакаленных заготовок деталей не требуется значительных усилий, затрачиваемых на деформирование обрабатываемой поверхности, следовательно, можно применять инструмент, снабженный шарами большего диаметра с соплами меньшего диаметра.

Влияние направления вращения обрабатываемой заготовки и шаров на шероховатость накатанной поверхности инструментом [96] представлено на рисунке 6.11.

Из зависимостей видно, что накатывание поверхности возможно как при встречном, так и при попутном вращении деформирующих шаров и заготовки. Определяющими условиями при этом являются, во-первых, параметр шероховатости, во-вторых, производительность обработки с учетом степени жесткости заготовки. Исследовалось влияние конструктивных элементов пневмонакатника центробежного действия, т. е. диаметров сопел и шаров на частоту вращения последних.

Обработка выполнялась на токарно-винторезном станке мод. 16К20 без вращения шпинделя станка при различных давлениях сжатого воздуха 0,1; 0,2 и 0,4 МПа (рисунок 6.12).

Инструмент вводился в отверстие во втулке, но так, чтобы были видны деформирующие шары. Измерение частоты вращения шаров выполнялось с помощью стробоскопа.

Верхний уровень диаметра шаров – 12,7 мм, нижний – 7,9 мм. Верхний уровень давления P_1 составил 0,4 МПа, нижний – 0,1 МПа.

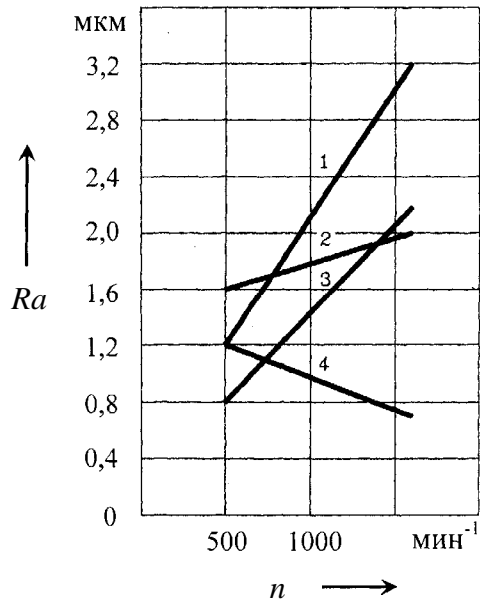
В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения:

– при $P_{\max} = 0,4$ МПа

$$Y = 51,25 + 12,75X_1 - 6,75X_2 + 12,25X_3;$$

– при $P_{\max} = 0,3$ МПа

$$Y = 47,25 + 12,5X_1 - 7,75X_2 + 8,87X_3.$$



1 — для встречного вращения заготовки и шаров при $P_1 = 0,2$ МПа, $S = 0,7$ мм/об. Количество рабочих ходов инструмента — 1

2 — для попутного вращения заготовки и шаров при $P_1 = 0,2$ МПа, $S = 0,7$ мм/об. Количество рабочих ходов инструмента — 1

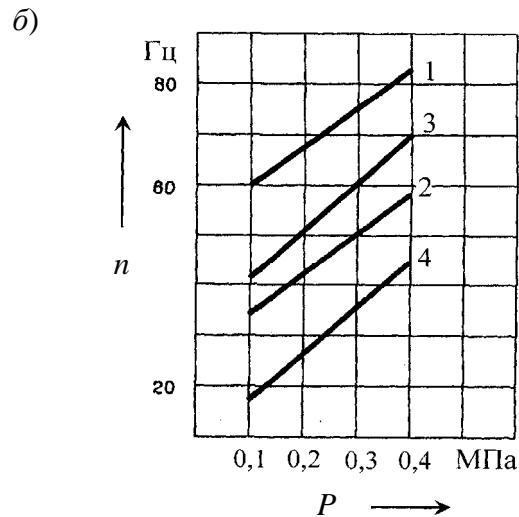
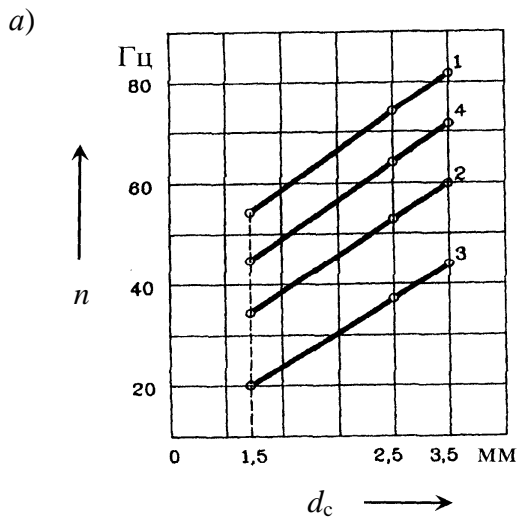
3 — для встречного вращения заготовки и шаров при $P_1 = 0,2$ МПа, $S = 0,1$ мм/об. Количество рабочих ходов инструмента — 1

4 — для попутного вращения заготовки и шаров при $P_1 = 0,2$ МПа, $S = 0,1$ мм/об. Количество рабочих ходов инструмента — 1

Обрабатываемый материал — сталь 45

Применяемое оборудование — токарно-винторезный станок мод. 16К20

Рисунок 6.11 — Влияние направления вращения обрабатываемой заготовки и шаров на шероховатость поверхности



1 — для диаметра шара $d_{ш} = 7,9$ мм и $P_1 = 0,1$ МПа
 2 — для диаметра шара $d_{ш} = 7,9$ мм и $P_1 = 0,4$ МПа
 3 — для диаметра шара $d_{ш} = 12,7$ мм и $P_1 = 0,1$ МПа
 4 — для диаметра шара $d_{ш} = 12,7$ мм и $P_1 = 0,4$ МПа

1 — для диаметра сопел $d_c = 3,5$ мм и $d_{ш} = 7,9$ мм
 2 — для диаметра сопел $d_c = 1,5$ мм и $d_{ш} = 7,9$ мм
 3 — для диаметра сопел $d_c = 3,5$ мм и $d_{ш} = 12,7$ мм
 4 — для диаметра сопел $d_c = 1,5$ мм и $d_{ш} = 12,7$ мм

a — от диаметра сопел; b — от величины давления сжатого воздуха P_1

Рисунок 6.12 — Графики зависимости частоты вращения деформирующих шаров пневматического шарикового раскатника центробежного действия

Анализ уравнений позволил сделать вывод, что модель адекватна и все коэффициенты значимы, т. к. они больше доверительного интервала, равного 2,3. Наибольшее влияние на увеличение частоты вращения шаров оказывает диаметр сопел, а затем давление сжатого воздуха в осевой полости оправки инструмента (см. рисунок 6.12). При увеличении давления сжатого воздуха с 0,3 до 0,4 МПа X_3 увеличивается с 8 до 12. Увеличение диаметра шаров увеличивает их частоту вращения [147].

6.3 Обработка керамическими шарами внутренних цилиндрических поверхностей стальных заготовок с твердостью ≤ 64 HRC

Для установления технологических возможностей комбинированной абразивной и упрочняющей пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения была выполнена экспериментальная обработка заготовок с высокой твердостью материала в соответствии с [38]. Согласно способу, должна производиться тонкая абразивная пневмоцентробежная, а затем пневмоцентробежная отделочно-упрочняющая обработка. В качестве модельного объекта обработки внутренних цилиндрических поверхностей выбраны кольца подшипников из стали ШХ15 после чистового внутреннего шлифования ($Ra \leq 0,6$ мкм). При абразивной пневмоцентробежной обработке использовались керамические шары диаметром 13 мм, применяемые в галтовочных барабанах при обработке шаров подшипников. Диаметр сопел в инструменте – 2,5 мм.

С целью исследования влияния исходной шероховатости поверхности и давления воздуха, подводимого к инструменту, на геометрические характеристики качества обработанной поверхности был проведен полнофакторный эксперимент. В качестве параметра оптимизации выбрана шероховатость поверхности Ra . Частота вращения заготовки и продольная подача инструмента были постоянны во всех экспериментах и составили $n = 100$ мин⁻¹, $S = 0,05$ мм/об. Количество рабочих ходов инструмента $i = 5$ определено экспериментальным путем.

Основные уровни давления воздуха в рабочей полости инструмента выбирались на основании предварительных экспериментов и составили $P_1 = 0,25$ МПа и $P_1 = 0,1$ МПа. При увеличении давления более 0,25 МПа происходит быстрое изнашивание керамических шаров, а при уменьшении давления меньше 0,1 МПа увеличивается время обработки деталей.

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, отражающее зависимость шероховатости поверхности от ис-

ходного значения и давления сжатого воздуха: $Y = 0,37 + 0,032X_1 + 0,08X_2$. Анализ уравнения позволил установить, что модель адекватна и значимыми являются оба коэффициента, т. к. они больше доверительного интервала, равного 0,02. Наибольшее влияние на качество поверхности оказывает давление воздуха. Так, при $P_1 = 0,25$ МПа шероховатость обеспечивается в пределах $Ra = 0,42 \dots 0,50$ мкм, при $P_1 = 0,1$ МПа – в пределах $Ra = 0,27 \dots 0,3$ мкм (рисунок 6.13).

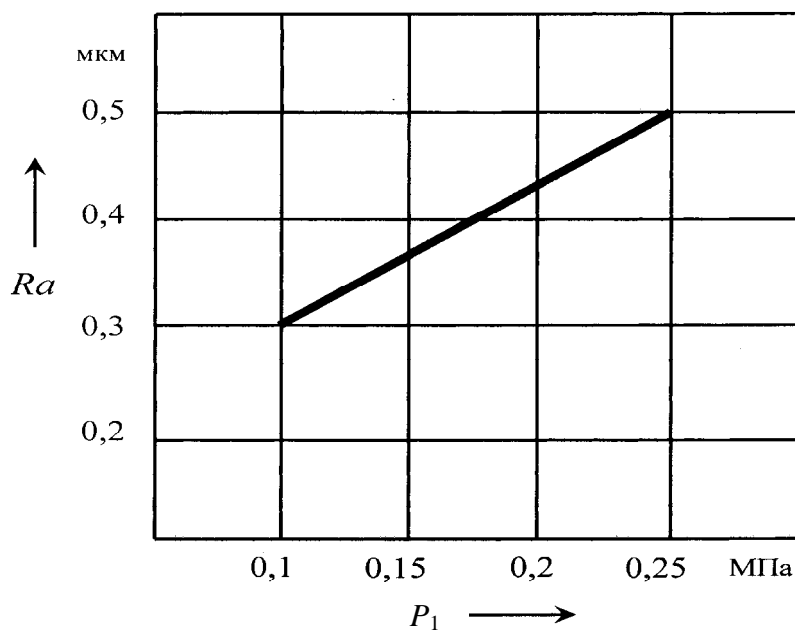
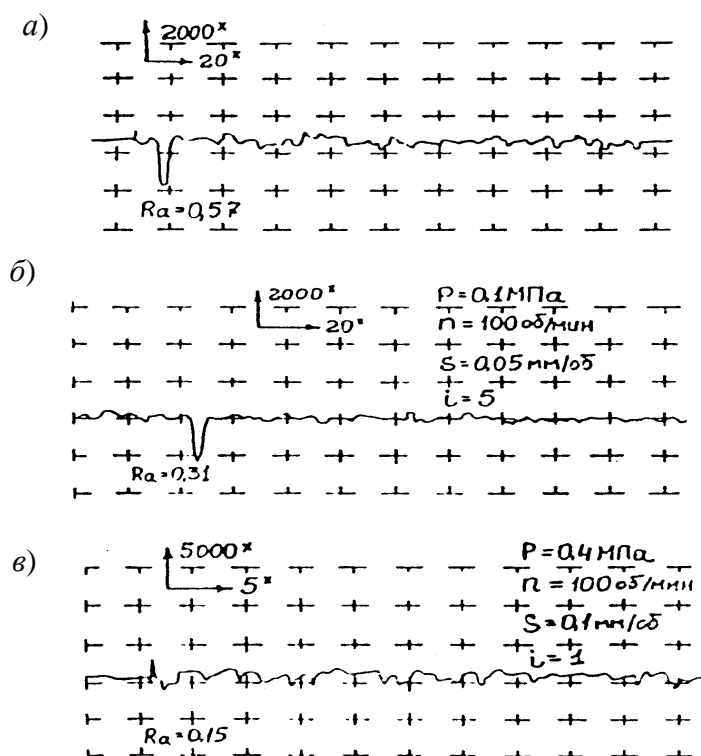


Рисунок 6.13 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха P_1

Как показали проведенные эксперименты, качество обработанной поверхности при абразивной пневмоцентробежной обработке зависит от зернистости керамических шаров и от усилия их прижима к обрабатываемой поверхности. При давлении воздуха $P_1 = 0,25$ МПа усилие воздействия керамических шаров на обрабатываемую поверхность большее и абразивные зерна оставляют на ней более глубокий след. Поэтому даже при исходной шероховатости поверхности $Ra = 0,30$ мкм происходит увеличение данного параметра до 0,5 мкм.

При уменьшении рабочего давления до 0,1 МПа усилие воздействия шаров на обрабатываемую поверхность уменьшается, и в результате чего улучшается качество обработанной поверхности. Профилограммы поверхностей, исходной, т. е. обработанной абразивом на внутришлифовальном станке (заводской вариант), и обработанной рассматри-

ваемым способом, представлены на рисунке 6.14 а, б, круглограммы – на рисунках 6.15 и 6.16.



а – после чистового шлифования; б – после абразивной пневмоцентробежной обработки; в – после упрочняющей пневмоцентробежной обработки

Рисунок 6.14 – Профилограммы шероховатости поверхности

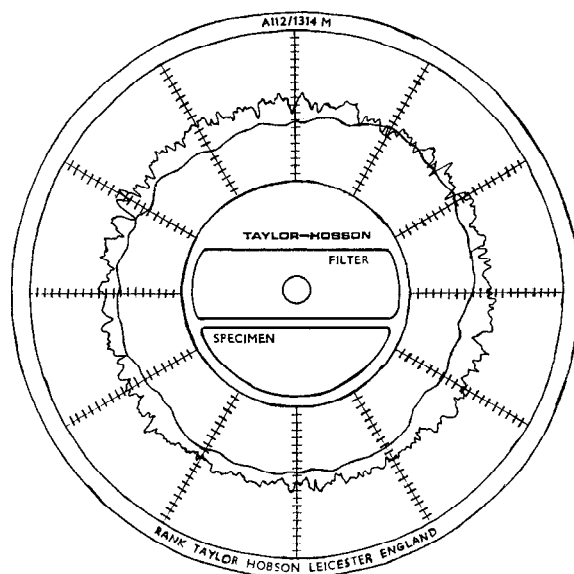


Рисунок 6.15 – Круглограмма поверхности после круглого чистового внутреннего шлифования

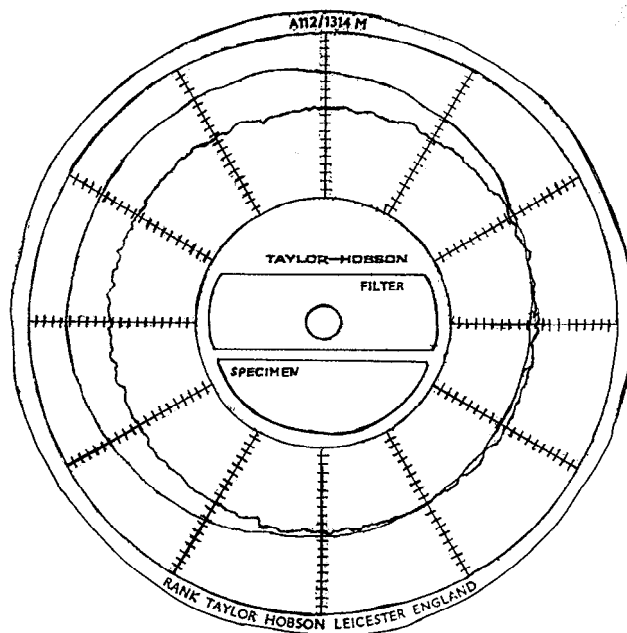


Рисунок 6.16 – Круглограмма поверхности после тонкой абразивной пневмоцентробежной обработки

Измерения отклонений от круглости и волнистости обработанной поверхности, выполненные на ОАО «Минский подшипниковый завод», показали, что отклонение от круглости исходной (шлифованной) поверхности равно 1,6 мкм, волнистость – 1,5 мкм. После абразивной пневмоцентробежной обработки эти параметры составили по 1,4 мкм, т. е. наблюдается их уменьшение.

6.4 Пневмоцентробежная обработка внутренних цилиндрических поверхностей заготовок колец подшипников с высокой твердостью шарами из стали ШХ15 после абразивной пневмоцентробежной обработки

При упрочняющей пневмоцентробежной обработке деталей применялся накатник с соплами диаметром 3,5 мм, снабженный шарами диаметром 7,8 мм из материала ШХ15. Заготовка – кольцо подшипника из стали ШХ15 с твердостью материала 64 HRC, прошедшее внутреннее шлифование и тонкую абразивную пневмоцентробежную обработку. Номинальный внутренний диаметр – 65 мм.

Частота вращения заготовки для всех экспериментов была постоянной и составляла 100 мин⁻¹. Минимальная подача инструмента оп-

ределялась на основании однофакторного эксперимента при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,4$ МПа, при подаче $S = 0,05$ мм/об – $Ra = 0,13$ мкм, при подаче $S = 0,2$ мм/об – $Ra = 0,16$ мкм. Исходная шероховатость поверхности после тонкой абразивной пневмоцентробежной обработки $Ra = 0,24 \dots 0,30$ мкм. Обработка выполнялась за один рабочий ход.

Профилограмма поверхности после пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки представлена на рисунке 6.14, в, ее круглограмма – на рисунке 6.17.

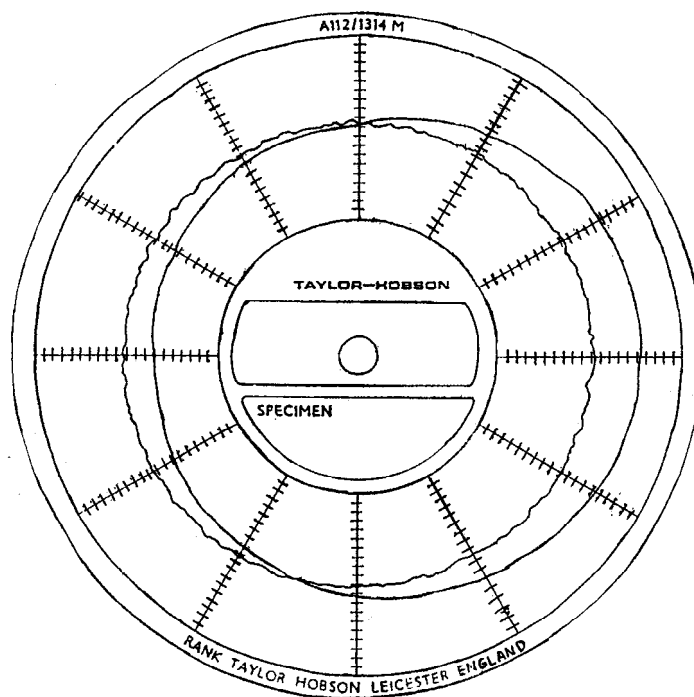


Рисунок 6.17 – Круглограмма поверхности после пневмоцентробежной финишной упрочняющей обработки

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, отражающее зависимость шероховатости поверхности от ее исходного значения, давления воздуха в рабочей полости инструмента и подачи: $Y = 0,267 + 0,067X_1 - 0,032X_2 + 0,002X_3$.

Проанализировав уравнение, установили, что модель адекватна и значимыми являются коэффициенты $b_1 = 0,067$ и $b_2 = 0,032$, т. к. они больше доверительного интервала, равного 0,009.

Наибольшее влияние на качество поверхности оказывает исходное значение шероховатости поверхности. Как и в ранее проведенных экспериментах, пневмоцентробежная упрочняющая обработка цилиндрических внутренних поверхностей позволяет уменьшить шероховатость

поверхности примерно на 50 %. Меньшее влияние на конечный результат оказывает изменение давления воздуха.

В выбранном для экспериментов интервале варьирования значений (от 0,1 до 0,4 мм/об или от 10 до 40 мм/мин) подача существенного влияния не оказывает и коэффициент $b_3 = 0,002$ меньше доверительного интервала, равного 0,009, т. е. он не значим.

Согласно эксперименту, упрочняющая пневмоцентробежная обработка позволяет уменьшить шероховатость поверхности примерно на 50 % при исходной шероховатости поверхности $Ra > 0,2$ мкм.

Анализ отклонений округлости и волнистости поверхностей, обработанных по данной технологии, показал, что отклонение от округлости и волнистости поверхности уменьшилось соответственно с 1,6 до 1,4 мкм и с 1,5 до 1,2 мкм [65, 66].

6.5 Импульсно-ударная обработка внутренних цилиндрических поверхностей

В центральной технологической лаборатории МоАЗ были проведены экспериментальные исследования импульсно-ударного инструмента (см. рисунок 1.7). Основные его параметры приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Основные параметры импульсно-ударного инструмента для обработки отверстий

Наименование параметра	Величина
Номинальный диаметр обрабатываемого отверстия $D_{отв}$, мм	125
Наружный диаметр инструмента $D_{и}$, мм	124,3
Диаметр приводящих шаров $d_{ш1}$, мм	13,5
Количество приводящих шаров $z_{ш1}$, шт.	20
Диаметр деформирующих шаров $d_{ш2}$, мм	9,5
Количество деформирующих шаров $z_{ш2}$, шт.	38
Диаметр сопел d_c , мм	3
Количество сопел z_c , шт.	6

Материал заготовок – сталь 40Х и чугун марки КЧ35 (270...300 НВ). Перед накатыванием заготовки проводили ее токарную обработку, после которой были получены диаметр отверстия 125 Н8^(+0,08) и шероховатость $Ra = 5...1,25$ мкм. Заготовки обрабатывали на токарном станке мод. 16К20

импульсно-ударным инструментом. Давление сжатого воздуха при этом $P_1 = 0,5...0,7$ МПа.

Цель экспериментальных исследований – определение основных конструктивных параметров нового инструмента и оптимальных режимов обработки, исследование некоторых параметров полученного микро-рельефа поверхности и точности параметров заготовок.

Для стали 40X при частоте вращения детали $n = 250...1250$ мин⁻¹ при одном проходе инструмента отмечалась линейная зависимость влияния подачи $S = 0,05$ мм/об на шероховатость поверхности $Ra = 1...0,63$ мкм при исходной шероховатости $Ra = 3...2,5$ мкм. Если после растачивания величина микронеровностей составляла $Ra = 1,25...1$ мкм, то при тех же режимах обеспечивалась шероховатость $Ra = 0,63...0,32$ мкм. Нерегулярный микрорельеф может быть получен и при других режимах обработки (P , n_d , S). Однако линейной зависимости при этом не прослеживается. Обработку раскатыванием поверхности детали из ковкого чугуна проводили при тех же режимах, что и деталей из стали 40X. Величина микронеровностей раскатанной поверхности снижается по сравнению с исходной шероховатостью не более чем в 2...4 раза.

Установлено, что при изменении конструктивных параметров инструмента и режимов обработки можно получить новый микрорельеф в виде лунок шероховатостью $Ra = 2,5...0,32$ мкм. При этом из конструктивных параметров наибольшее влияние на шероховатость оказывает изменение величины перекрытия шаров h , а из режимов обработки – изменение давления сжатого воздуха P .

Так как исследуемый инструмент предполагалось использовать для обработки деталей машин, шероховатость поверхности отверстий которых в соответствии с требованиями чертежа составляет $Ra = 2,5...1,6$ мкм, в процессе экспериментов были определены необходимые конструктивные параметры инструмента и режимы обработки.

Приняты следующие конструктивные параметры: ширина внутренней кольцевой канавки, в которой размещены шары ($C = 16,1$ мм); ширина внешней кольцевой канавки, в которой размещены бойки ($c = 10,7$ мм); угол между направляющими, по которым перемещаются шары ($2\alpha = 90^\circ$); величина перекрытия шаров (разность между наиболее удаленной от оси инструмента точкой шара и наименее удаленной от оси инструмента точкой бойка) $h = 1,6$ мм. Режимы обработки: $n_d = 500$ об/мин; $S = 0,1$ мм/об; $N_F = 30$ уд/мм²; давление сжатого воздуха для обработки чугуна марки КЧ-35 – $P_1 = 0,65$ МПа, для обработки стали 40X – $P = 0,4$ МПа; направление вращения детали и шаров встречное. Полученный новый микрорельеф состоял из лунок глубиной

5...15 мкм с шагом 400...1000 мкм. Изменение размера составляло 20 мкм на диаметр отверстия.

Исследования геометрических характеристик качества поверхности, полученной в результате импульсно-ударной обработки, показывают, что средний тангенс угла подъема выступов профиля равен 2° , средний радиус выступов профиля – 2500...3300 мкм, относительная опорная длина профиля на уровне средней линии – t_{50} . Эти величины соизмеримы с вибронакатыванием [35] и превосходят в 2...5 раз значения, характерные для накатывания, внутреннего шлифования, растачивания.

6.6 Технологические возможности упрочняющей пневмовибродинамической импульсно-ударной обработки наружных поверхностей вращения – нежестких штоков

Технология упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения может применяться для упрочнения незакаленных наружных поверхностей вращения деталей машин, работающих в режиме трения–скольжения.

Лунки, образовавшиеся после применения представленной технологии на одной из поверхностей пары трения, являются микро-резервуарами для накопления смазки и при работе пары трения обеспечивают непрерывную подачу смазки, что препятствует разрыву масляной пленки. Кроме того, между поверхностями трения благодаря заполненным смазкой лункам возникает множество гидродинамических клиньев и режим трения приближается к гидродинамическому, что обеспечивает высокую износостойкость рабочих поверхностей.

Поверхности, полученные импульсно-ударной пневмовибродинамической обработкой, обладают высокой гидроплотностью как для подвижных, так и для неподвижных соединений [14].

В [35] показано, что с переходом на штоки гидроцилиндров с поверхностью в виде сетки лунок силы трения в узлах уменьшаются на 20...25 %, а герметичность увеличивается на 10...18 %. Повышение гидроплотности уплотнения достигается за счет дискретного расположения лунок, что создает лабиринтное уплотнение, уменьшающее канал сквозных утечек.

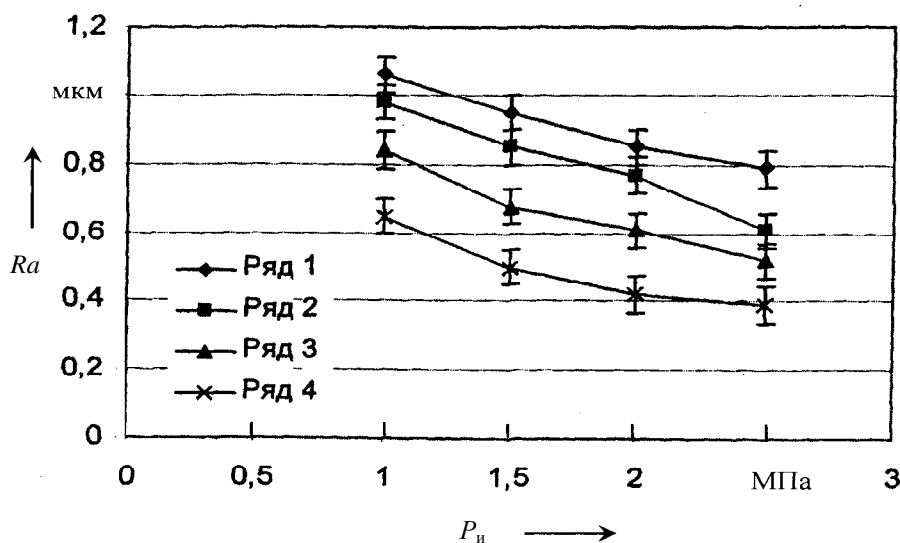
Исследования импульсно-ударной обработки наружных поверхностей вращения проводились в лаборатории ОАО «Могилевский завод «Строммашина» при закрепленной в центрах заготовке на токарно-винторезном станке мод. 1К62. Инструментом для осуществления повер-

хностного пластического деформирования служил пневматический шариковый накатник центробежного действия (см. рисунок 3.6) с диаметром шаров $d_{ш} = 11,162$ мм, количеством шаров $z_{ш} = 22$, диаметром сопел $d_c = 3,3$ мм, количеством сопел $z_c = 5$.

Для оценки влияния режимов импульсно-ударной обработки на шероховатость наружных поверхностей вращения проводилась серия полнофакторных экспериментов.

1 Для заготовок из стали 45 диаметром 62 мм с твердостью 240...285 *HV* и исходной шероховатостью поверхности после точения $Ra = 2,07$ мкм. Наружный диаметр заготовки получен резцом, оснащенный эльборовым пластиной, при $n = 500$ мин⁻¹, $S = 0,097$ мм/об. Подача инструмента варьировалась в пределах $S_{min} = 0,07$ мм/об, $S_{max} = 0,21$ мм/об, частота вращения заготовки $n_{min} = 50$ мин⁻¹, $n_{max} = 200$ мин⁻¹, давление сжатого воздуха в камере инструмента $P_{min} = 0,1$ МПа, $P_{max} = 0,25$ МПа.

На рисунке 6.18 представлены зависимости $Ra = f(p)$ при величине вылета шара 0,15 мм, а также при различных скоростях вращения заготовки и подачах инструмента.



Ряд 1 – $S = 0,21$ мм/об, $n = 200$ мин⁻¹; ряд 2 – $S = 0,07$ мм/об, $n = 200$ мин⁻¹; ряд 3 – $S = 0,21$ мм/об, $n = 50$ мин⁻¹; ряд 4 – $S = 0,07$ мм/об, $n = 50$ мин⁻¹

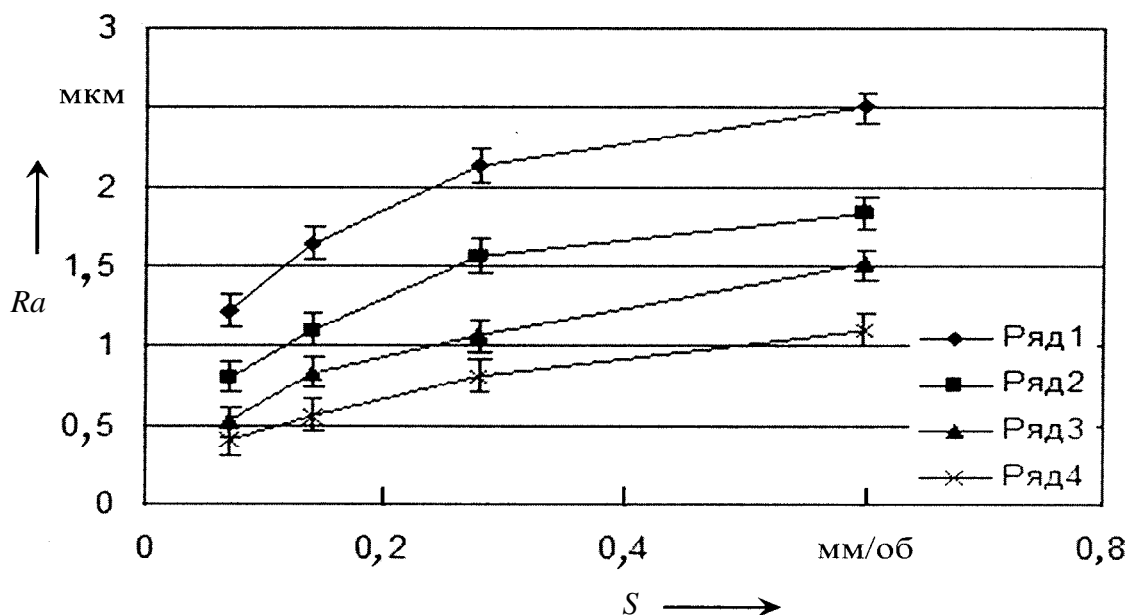
Рисунок 6.18 – Влияние давления подаваемого сжатого воздуха подачи на шероховатость накатанной поверхности

После обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии $Y = 0,699 + 0,095X_1 + 0,1X_2 - 0,12X_3$, при анализе которого установлено, что коэффициенты значимы и модель адекватно описывает исходные данные. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной

поверхности оказывает давление подводимого сжатого воздуха, наименьшее – подача инструмента.

2 Для заготовок из стали 45 диаметром 66 мм с твердостью 160...180 *HB* и исходной шероховатостью поверхности после точения $Ra = 1,55$ мкм. Наружный диаметр заготовки получен резцом, оснащенным твердосплавной пластиной Т30К4, при $n = 500$ мин⁻¹, $S = 0,097$ мм/об. Подача инструмента варьировалась в пределах $S_{\min} = 0,07$ мм/об, $S_{\max} = 0,21$ мм/об, частота вращения заготовки $n_{\min} = 50$ мин⁻¹, $n_{\max} = 200$ мин⁻¹, давление сжатого воздуха $P_{\min} = 0,1$ МПа, $P_{\max} = 0,18$ МПа.

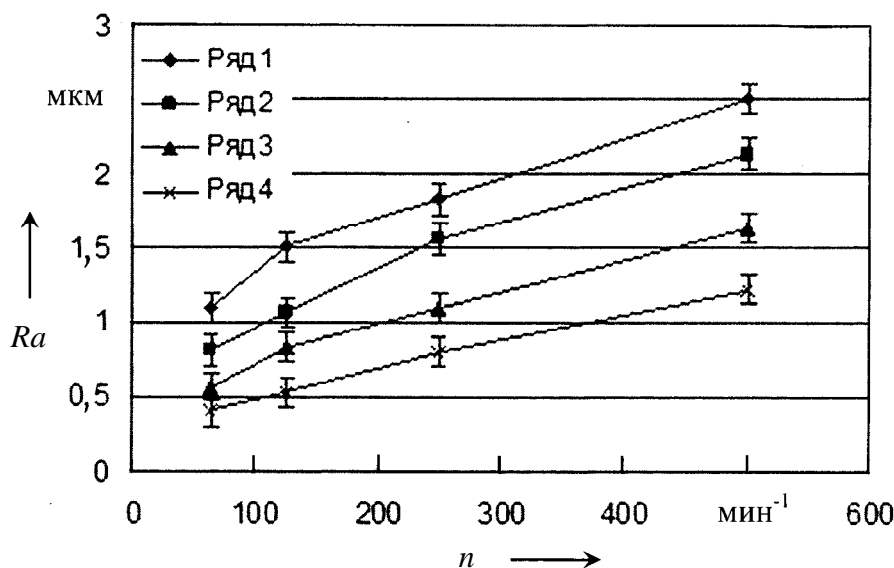
На рисунках 6.19 и 6.20 представлены зависимости $Ra = f(S)$ и $Ra = f(n)$ при давлении сжатого воздуха $P_{и} = 0,15$ МПа и величине вылета шара 0,15 мм, а также при различных скоростях вращения заготовки и подачах инструмента.



Ряд 1 – $n = 500$ мин⁻¹, ряд 2 – $n = 250$ мин⁻¹, ряд 3 – $n = 125$ мин⁻¹, ряд 4 – $n = 63$ мин⁻¹

Рисунок 6.19 – Влияние подачи инструмента на шероховатость накатанной поверхности

После обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии $Y = 0,591 + 0,118X_1 + 0,172X_2 - 0,0395X_3$, при анализе которого установлено, что коэффициенты значимы и модель адекватно описывает исходные данные. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает частота вращения заготовки, наименьшее – давление подводимого сжатого воздуха.



Ряд 1 – $S = 0,6$ мм/об; ряд 2 – $S = 0,28$ мм/об; ряд 3 – $S = 0,14$ мм/об; ряд 4 – $S = 0,07$ мм/об

Рисунок 6.20 – Влияние скорости вращения заготовки на шероховатость накатанной поверхности

3 Для заготовок из стали 45 диаметром 62 мм с твердостью 240...285 HV и исходной шероховатостью поверхности после шлифования $Ra = 0,17$ мкм. Наружный диаметр заготовки получен шлифованием при $n_d = 110$ мин⁻¹, $n_{кр} = 50$ м/с, $S = 60$ мм/об. Подача инструмента $S = 0,07$ мм/об, частота вращения заготовки $n_{min} = 50$ мин⁻¹, $n_{max} = 200$ мин⁻¹, давление сжатого воздуха $P_{min} = 0,1$ МПа, $P_{max} = 0,2$ МПа.

После обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии $Y = 0,349 + 0,044X_1 + 0,055X_2$, при анализе которого установлено, что коэффициенты значимы и модель адекватно описывает исходные данные. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает давление подводимого сжатого воздуха.

4 Для заготовок из стали 45 диаметром 55 мм с твердостью 180...190 HV и исходной шероховатостью поверхности после шлифования $Ra = 0,23$ мкм. Наружный диаметр заготовки получен шлифованием при $n_d = 110$ мин⁻¹, $n_{кр} = 50$ м/с, $S = 60$ мм/об. Подача инструмента варьировалась в пределах $S_{min} = 0,07$ мм/об, $S_{max} = 0,21$ мм/об, частота вращения заготовки $n_{min} = 50$ мин⁻¹, $n_{max} = 200$ мин⁻¹. Эксперимент проводился при давлении подаваемого сжатого воздуха в камере инструмента $P = 0,2$ МПа.

После обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии $Y = 0,23 + 0,016X_1 + 0,018X_2$, при анализе которого установлено, что коэффициенты значимы и модель адекватно описывает исходные

данные. Наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает частота вращения заготовки.

6.7 Упрочняющая импульсно-ударная обработка плоских поверхностей

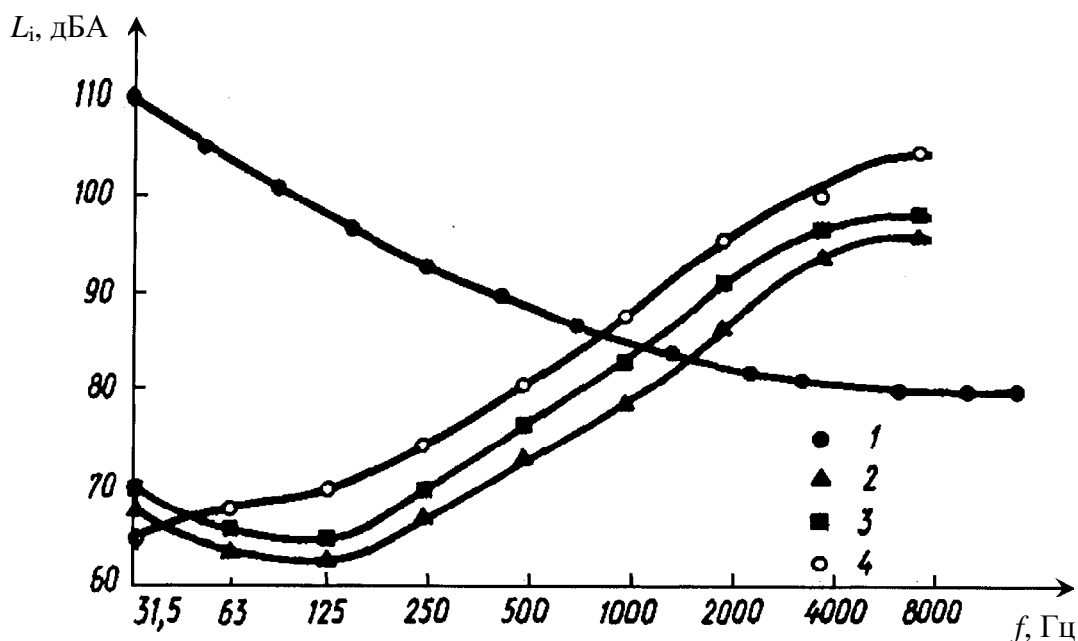
Импульсно-ударная обработка плоских рабочих поверхностей деталей с использованием различных конструктивных схем накатников, рассмотренных в работе, обеспечивает получение гидроплотных соединений, а также способствует повышению износостойкости плоских поверхностей деталей машин.

6.7.1 Исследования технологических возможностей импульсно-ударной ПВДО для повышения гидроплотности стыка плоскостей корпусных и других деталей. Решение задачи создания гидроплотных соединений технологическими методами является актуальным в технологии машиностроения. Так, например, в [148] отмечено, что большое влияние на экономичность и долговечность автомобильной техники оказывает герметичность фланцевых соединений двигателя и других агрегатов. По данным фирмы «Локтайт» (Loctite, США), потери рабочих сред (топлива, масел) вследствие неудовлетворительной герметичности стыков корпусных агрегатов, узлов и других изделий автомобильной техники составляют 30 %. Вместе с тем, традиционное повышение герметичности обеспечивается прокладками из листовых или формованных деформирующихся материалов, применение которых требует строгой параллельности плоскостей сопрягаемых деталей, что достигается высокой точностью их обработки и не всегда экономически оправдано. Вместо прокладок применяют различного рода герметики, но их стоимость весьма высока.

На рисунке 6.21 показаны шумовые характеристики инструмента. Из рисунка следует, что при среднегеометрической частоте 1000 Гц уровень звукового давления, создаваемый шарами инструмента при давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,3...0,45$ МПа, не превышает санитарной нормы.

Согласно исследованиям, на качество поверхности после ПВДО влияет в первую очередь расстояние h от торца инструмента до обрабатываемой поверхности. Для определения влияния h на Ra использовались заготовки – прямоугольные плиты из стали 35, поверхность которых перед накатыванием шлифовалась до шероховатости $Ra = 0,45...0,65$ мкм. При ПВДО минутная подача стола станка $S_{мин}$

составляла 56 мм/мин при количестве проходов инструмента $i = 1$. Давление сжатого воздуха $P_1 = 0,2$ МПа.



1 – предельный спектр ПС 85; 2 – спектр шума накатника при $P_n = 0,3$ МПа; 3 – $P_n = 0,4$ МПа; 4 – при $P_n = 0,45$ МПа

Рисунок 6.21 – Шумовые характеристики инструмента для ИУ ПВДО плоских поверхностей

На рисунке 6.22 представлена зависимость $Ra = f(h)$. Из рисунка видно, что образование по всей поверхности густой сетки лунок со 100-процентным перекрытием шлифованной поверхности обеспечивается при $h = 0,5...2$ мм и $Ra = 0,7...2$ мкм. Получен новый вид топографии поверхности в отличие от шлифованной. Шероховатость поверхности в данном случае выше. При $h = 2...2,5$ мм происходит накатывание поверхности, но без образования лунок. При этом $Ra = 0,4...1,7$ мкм.

При накатке поверхности материала заготовки из стали 35, шлифованной до $Ra = 0,24...0,32$ мкм, и давлении сжатого воздуха $P_1 = 0,35$ МПа (рисунок 6.23) отмечено принципиальное отличие от предыдущего варианта обработки. Здесь на поверхность наносится густая сетка лунок со 100-процентным перекрытием шлифованной поверхности $Ra = 0,3...1,65$ мкм при $i = 1$ и $S = 56$ мм/мин.

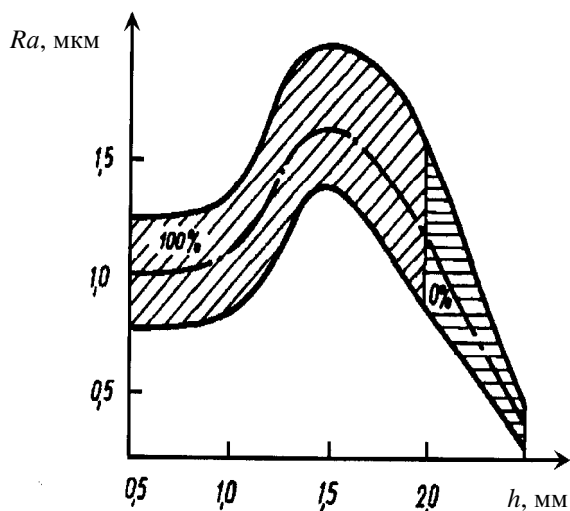


Рисунок 6.22 – Зависимость шероховатости накатанной поверхности ($Ra_{исх} = 0,45...0,65$ мкм) от величины зазора h

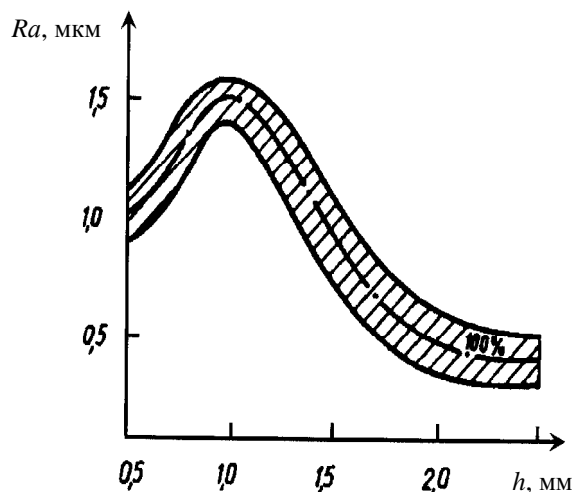


Рисунок 6.23 – Зависимость шероховатости накатанной поверхности ($Ra_{исх} = 0,24...0,32$ мкм) от величины зазора h

При исходной шероховатости поверхности $Ra = 0,7...1,2$ мкм после ПВДО обеспечивается $Ra = 0,49...2,2$ мкм и плотность размещения лунок на поверхности от 10 до 100 % в зависимости от значения S (рисунок 6.24).

Значительная часть корпусных деталей изготовлена из чугуна, поэтому представляет интерес исследование влияния процесса ПВДО на качество поверхности, которую впоследствии можно использовать для обеспечения гидроплотного соединения в контакте с поверхностью другой детали в зависимости от конкретных технических условий.

В качестве обрабатываемого материала заготовок был выбран серый чугун СЧ21. Ширина каждой заготовки равнялась 180 мм, диаметр расположения деформирующих шаров в инструменте – 164,7 мм. Величина зазора между инструментом и деталью $h = 1$ мм. Шероховатость поверхности заготовки после шлифования $Ra = 0,4...0,6$ мкм. Давление сжатого воздуха $P_1 = 0,39...0,4$ МПа. Количество проходов инструмента $i = 1$.

На рисунке 6.24 представлены зависимости $Ra = f(S)$ и другие характеристики качества поверхности. Разброс значений шероховатости поверхности после ПВДО без учета различных по качеству участков поверхности составляет 0,4...2,1 мкм.

Были подвергнуты ПВДО заготовки из серого чугуна СЧ21 с шероховатостью $Ra = 0,6...0,8$ мкм после шлифования (ширина заготовки 70 мм). При этом $P_1 = 0,39...0,4$ МПа, $h = 1$ мм, $i = 1$.

На рисунке 6.26 представлена зависимость $Ra = f(S)$, где наблю-

дается более плотное, чем на рисунке 6.15, расположение лунок по поверхности. Шероховатость при этом составляет $Ra = 1,25...2,6$ мкм.

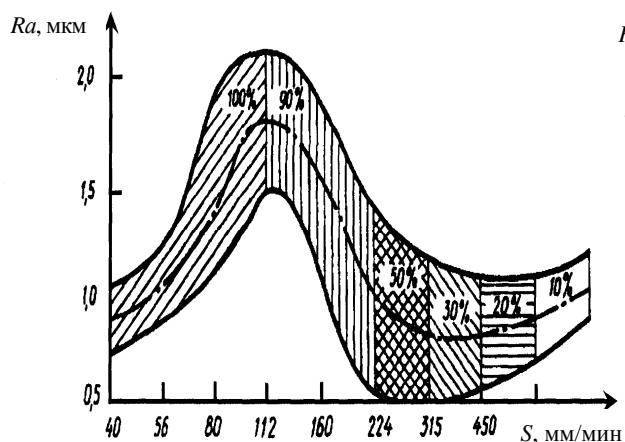


Рисунок 6.24 – Зависимость шероховатости накатанной поверхности и плотности расположения лунок ($Ra_{исх} = 0,7...1,2$ мкм) от режимов процесса обработки

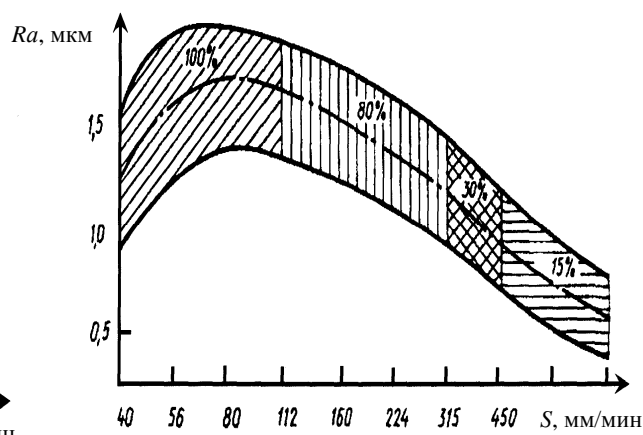


Рисунок 6.25 – Зависимость шероховатости накатанной поверхности и плотности расположения лунок для заготовки из серого чугуна СЧ21, шлифованной до $Ra_{исх} = 0,4...0,6$ мкм, от режимов процесса обработки

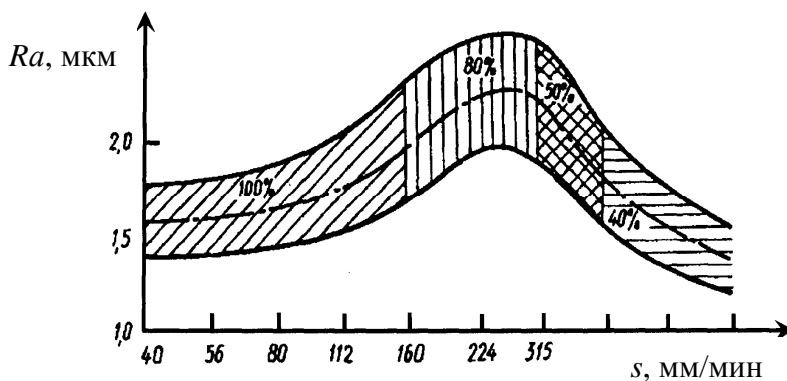


Рисунок 6.26 – Зависимость шероховатости накатанной поверхности и плотности расположения лунок для заготовки из серого чугуна СЧ21, шлифованной до $Ra_{исх} = 0,6...0,8$ мкм, от режимов процесса обработки

Смещение максимума Ra вправо (см. рисунок 6.26) в отличие от смещения на рисунке 6.23 объясняется тем, что при ширине заготовки 70 мм деформирующие шары теряли определенную часть энергии, встречая сопротивление при контакте с каждой кромкой торца заготовки (ширина заготовки 70 мм, расположение шаров по диаметру 164,7 мм).

Таким образом, ПВДО плоских поверхностей обеспечивает получение сетки лунок с требуемой степенью плотности их расположения, а также $Ra = 0,5...2,0$ мкм при исходной шероховатости $Ra = 0,4...1,2$ мкм. При этом степень плотности расположения лунок должна задаваться техническими условиями чертежа детали.

В качестве деталей для испытаний были выбраны блок и головка цилиндров двигателя к трактору МТЗ-80. Материал деталей – серый чугун СЧ21 (ГОСТ 1412-70). Неплоскостность поверхности стыка головки и блока цилиндров – не более 0,05 мм на длине 500 мм, шероховатость поверхности – 2,5 мкм. При сборке головки с блоком цилиндров между ними устанавливаются прокладки, покрытые маслографитовой пастой, однако в процессе эксплуатации имеют место случаи нарушения герметичности стыка – при этом необходимы разборка двигателя и устранение причин аварии.

Цель испытаний – определение влияния микрорельефов, полученных импульсно-ударной обработкой сопрягаемых поверхностей головки и блока цилиндров, на герметичность стыка при его уплотнении прокладками. Блок цилиндров обрабатывался на радиально-сверлильном станке мод. 2Н55, а головка цилиндров – на вертикально-фрезерном станке мод. 6Р13. Подача $S = 63$ мм/мин, давление сжатого воздуха $P_1 = 0,5$ МПа. Расстояние от нижнего торца пневмообкатника до обрабатываемой поверхности (вертикальный натяг) – 1,3 мм.

Шероховатость поверхности Ra после нанесения нового микрорельефа в виде сетки лунок составила 2,5 мкм. Профилограмма поверхности головки блока после ПВДО представлена на рисунке 6.27. Следы режущих лезвий ножей фрезы после обработки почти незаметны. Испытания проводились на двигателе Д-240 по заводской методике при избыточных давлениях воды 0...0,3 МПа. Детали после ПВДО соответствовали техническим требованиям.

Перед установкой прокладки покрывали маслографитовой пастой в соответствии с требованием чертежа. Для закрепления головки цилиндров гайки затягивали с помощью динамометрического ключа (предел измерений 0...300 Н·м и цена деления 10 Н·м) по технологической схеме, используя момент, равный 180 Н·м. Согласно испытаниям, новый микрорельеф обеспечивает герметичность стыка.



Рисунок 6.27 – Профилограмма накатанной поверхности головки блока цилиндров ДВС МТЗ

Можно предположить, что даже после чистового фрезерования на поверхностях деталей имеются следы кругового движения режущих лезвий фрезы, по которым вода может просачиваться в камеру сгорания двигателя, выводя его из строя, при незначительном нарушении плотности стыка ввиду неравномерности толщины прокладки. Лунки на поверхности деталей локализуют уплотнение стыка, делают его гидроплотным соединением, несмотря на неравномерную толщину прокладки.

С другой стороны, не исключено, что с учетом малой жесткости головки цилиндров, а также новых эксплуатационных свойств микрорельефа в виде лунок можно изготавливать поверхности сопрягаемых деталей не по параметрам неплоскостности (0,05 мм на длине детали) и Ra , а лишь по полученному микрорельефу, легко контролируемому режимами процесса обработки. Это избавит от необходимости выполнения жестких технических условий по макрогеометрии поверхности детали, что, в свою очередь, упростит процесс изготовления и сборку деталей, повысит их качество и надежность. Исследованиями эксплуатационных свойств вибронакатанной шаровой поверхности [35] подтверждается эффект снижения утечки смазки в уплотнительных парах. Так, для вибронакатанной поверхности утечка смазки составляет $4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{с}$, а для шлифованной – $35 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{с}$.

6.7.2 Исследования технологических возможностей импульсно-ударной ПВДО для повышения износостойкости направляющих станин металлорежущих станков. При проведении экспериментов использовали модельные образцы заготовок из серого чугуна СЧ20 (170...229 НВ) с длиной 500 мм, шириной 90 мм, высотой 30 мм; исходная поверхность

была получена шлифованием со смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ) (эмулсол Э2).

Эксперименты проводились на широкоуниверсальном консольно-фрезерном станке мод. 6Т83Ш в условиях ремонтно-механического цеха ОАО «Могилевлифтмаш». В качестве инструмента был использован накатник [55]. Так как, кроме плоских направляющих станин, существуют и наклонные направляющие, то исследования проводились по двум вариантам обработки. В первом варианте обрабатываемая заготовка с инструментом располагались горизонтально, во втором – под углом 45° .

Измерение параметра шероховатости Ra обработанных поверхностей проводили на профилометре мод. 296.

Исследование влияния зазора между торцом инструмента h и обрабатываемой горизонтальной поверхностью на шероховатость Ra . Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P_{и} = 0,25$ МПа, подача $S = 63$ мм/мин, исходная шероховатость $Ra = 1,34$ мкм. В результате обработки по всей поверхности наносится густая сетка лунок со 100-процентным перекрытием шлифованной поверхности с обеспечением шероховатости обработанной поверхности $Ra = 1,4...2,6$ мкм при $h = 0,4...0,9$ мм. При $h = 0,9...1,1$ мм происходит накатывание поверхности без образования лунок, шероховатость находится в пределах $Ra = 0,9...1,4$ мкм.

Исследование влияния зазора между торцом инструмента h и обрабатываемой наклонной под углом 45° поверхностью на шероховатость Ra . Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P_{и} = 0,19$ МПа, подача $S = 80$ мм/мин, исходная шероховатость $Ra = 1,16$ мкм. В результате обработки на поверхность наносится густая сетка лунок со 100-процентным перекрытием шлифованной поверхности с обеспечением шероховатости $Ra = 0,8...1,85$ мкм при зазоре $h = 0,2...0,8$ мм. При $h = 0,8...1,1$ мм происходит накатывание поверхности без образования лунок.

Исследование влияния подачи инструмента S на шероховатость Ra обрабатываемой поверхности. Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P_{и} = 0,20$ МПа, зазор $h = 0,8$ мм, исходная шероховатость $Ra = 1,25$ мкм. В результате проведенных исследований получена зависимость $Ra = f(S)$ для горизонтальной поверхности. Отличительной особенностью является то, что в зависимости от величины подачи заготовки в процессе ПВДО образуются участки, различающиеся качеством поверхности с $Ra = 1,05...1,38$ при плотности лунок от 15 до 100 % (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Плотность распределения лунок по обрабатываемой поверхности в зависимости от подачи при давлении сжатого воздуха 0,2 МПа

Подача S , мм/мин	Плотность распределения лунок, %
50...80	100
80...125	80
125...250	60
250...315	50
315...400	30
400...500	15

При давлении сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P_{и} = 0,3$ МПа, зазоре $h = 0,8$ мм, исходной шероховатости $Ra = 1,2$ мкм наблюдается несколько иной характер зависимости $Ra = f(S)$ и распределения плотности микролунок (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Плотность распределения лунок по обрабатываемой поверхности в зависимости от подачи при давлении сжатого воздуха 0,3 МПа

Подача S , мм/мин	Плотность распределения лунок, %
50...125	100
125...160	80
160...250	60
250...400	40
400...500	15

Исследование влияния давления сжатого воздуха $P_{и}$ на шероховатость Ra обрабатываемой поверхности. Условия проведения эксперимента при обработке горизонтальной поверхности: зазор $h = 0,8$ мм, исходная шероховатость $Ra = 1,2$ мкм.

Условия проведения эксперимента при обработке наклонной поверхности: зазор $h = 0,6$ мм, исходная шероховатость $Ra = 1,26$ мкм.

Установлено, что зависимости шероховатостей обработанных поверхностей наиболее стабильны при давлениях $P_{и} < 0,30$ МПа. В этом случае меньше разброс числовых значений и меньше угол наклона кривых к оси абсцисс.

Согласно проведенным исследованиям технологических возможностей ИУ ПВДО, в результате обработки на поверхности образуется нерегулярный микрорельеф в виде непрерывно расположенных углублений (микролунок) (рисунок 6.28), основными параметрами которого являются глубина микроуглублений и их шаг. Глубина лунок находится в прямой зависимости от диаметра шаров-бойков и скорости движения шаров-ударников.

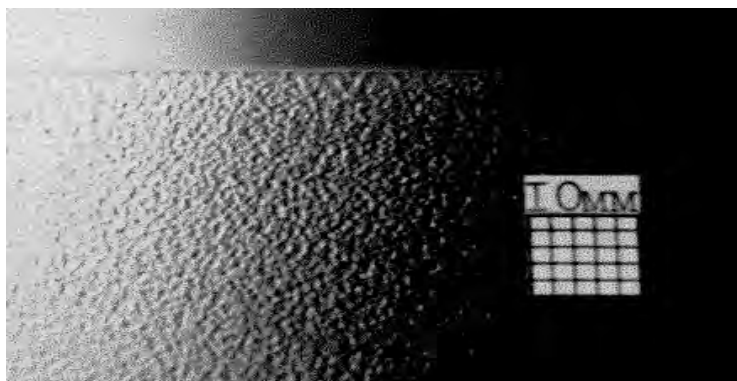


Рисунок 6.28 – Топография поверхности после ИУ ПВДО

Параметрическая оптимизация процесса ИУ ПВДО наиболее полно представлена в [62].

По результатам проведенных исследований были получены оптимальные режимы процесса ИУ ПВДО: давление сжатого воздуха в осевой полости инструмента $P_{и} = 0,15$ МПа, подача $S = 80$ мм/мин, зазор между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью для горизонтальных поверхностей $h = 0,6$ мм, для наклонных (под углом 45°) – $h = 0,4$ мм.

Исследования физико-механических характеристик поверхностей направляющих станин, прошедших ИУ ПВДО. С целью определения влияния ПВДО на физико-механические характеристики направляющих станин станков в ИМИНМАШ НАНБ были проведены рентгеноструктурные исследования модельных образцов из серого чугуна СЧ20 (материал направляющих станины) размерами $6 \times 6 \times 7$ мм на дифрактометре ДРОН-2.0.

ПВДО образцов из чугуна, обработанного предварительно тонким эльборовым фрезерованием, сопровождается измельчением частиц цементита и графита, увеличением плотности дефектов кристаллической решетки поверхностных слоев. Микротвердость поверхностных слоев при этом также заметно возрастает и достигает 3800...4000 МПа.

Исследования износостойкости поверхностей направляющих станин, прошедших ИУ ПВДО. Сравнительные износные испытания проводились на образцах направляющих, выполненных из серого чугуна СЧ20 (материал направляющих станины) размерами 6×6×7 мм. При исследованиях использовали схему возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с на трибометре АТВП, оснащённом специально разработанным устройством для измерения коэффициента трения [151].

Результаты испытаний представлены в таблицах 6.4 и 6.5.

Таблица 6.4 – Триботехнические свойства образцов рабочих поверхностей направляющих станин, прошедших обработку различными способами (трение без смазки; давление на образцы $P = 5$ МПа; контртело – текстолит)

Материал, способ обработки	Интенсивность весового изнашивания I_q , мг/км	Коэффициент трения f
СЧ20, шлифование	0,30	0,65...0,75
СЧ20, шлифование + ПВДО	0,24	0,68...0,70
СЧ20, шлифование с СОЖ	0,32	0,67...0,72
СЧ20, шлифование с СОЖ + ПВДО	0,27	0,65...0,72
СЧ20, тонкое фрезерование	0,35	0,65...0,70
СЧ20, тонкое фрезерование + ПВДО	0,25	0,60...0,70
СЧ20, закалка ТВЧ	0,73	0,50...0,80

Таблица 6.5 – Триботехнические свойства модельных образцов рабочих поверхностей направляющих станин, прошедших обработку различными способами (трение со смазкой И-20А; контртело – закаленная сталь 60Г)

Материал, способ обработки	Давление P_a , МПа	Интенсивность весового изнашивания I_q , мг/км	Коэффициент трения f
СЧ20, шлифование	40	78,4 (задир)	0,14
СЧ20, шлифование с последующей ИУ ПВДО	40	108,8 (задир)	0,12...0,23
СЧ20, шлифование с СОЖ	40	0,26	0,11
СЧ20, шлифование с СОЖ с последующей ИУ ПВДО	40	95,3 (задир)	0,12...0,25
СЧ20, тонкое фрезерование	40	0,36	0,11
СЧ20, тонкое фрезерование с последующей ИУ ПВДО	40	0,17	0,11

Установлено, что ПВДО образцов приводит к повышению износостойкости при испытаниях в условиях трения без смазочного материала. При этом наиболее существенное увеличение износостойкости обнаружено при ПВДО образца, подвергнутого предварительному тонкому фрезерованию. Износостойкость фрезерованного чугуна после ПВДО возрастает на 30 %.

На основании проведенных испытаний на изнашивание в режиме трения со смазочным материалом установлено (см. таблицу 6.5), что тонкое эльборовое фрезерование с последующей ПВДО образцов заготовок приводит к повышению их износостойкости в 1,5 раза по сравнению со шлифованными образцами и в 2 раза по сравнению с образцами, обработанными только фрезерованием. ПВДО способствует уменьшению изнашивания в условиях испытаний с высокими контактными давлениями, что свидетельствует о повышении стойкости к задиру.

Исследования микротвердости поверхностного слоя заготовки после ПВДО (рисунок 6.29) показали, что глубина залегания упрочняющего слоя (до 0,3 мм) находится в пределах допустимого износа направляющих (0,2 мм) [152].

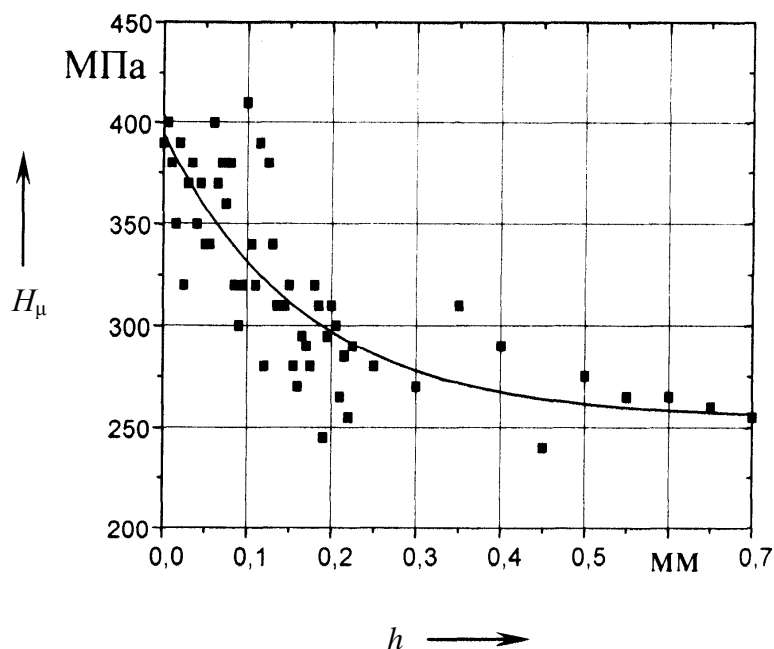


Рисунок 6.29 – Распределение микротвердости H_{μ} в поверхностном слое (h – глубина залегания) образца после тонкого эльборования с последующей ПВДО

7 Исследование суперфинишной пневмоцентробежной обработки внутренних цилиндрических поверхностей

7.1 Технологические возможности процесса суперфинишной ПЦО при неподвижной заготовке

Суперфинишная ПЦО без вращения заготовки позволила бы снизить энергоемкость процесса, упростить и удешевить обработку. Исследования суперфинишной ПЦО с вертикальной подачей инструмента при неподвижной заготовке проведены в инструментальном цехе ОАО «Могилевский завод «Строммашина» на радиально-сверлильном станке, в шпиндель которого устанавливался шариковый накатник, для предотвращения его вращения было использовано специально разработанное устройство. Заготовка неподвижно крепилась на тумбе станка, в процессе обработки для вращения шаров в осевой канал инструмента подавался сжатый воздух, инструмент осуществлял только вертикальную подачу вдоль оси заготовки (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 – Технологическое оснащение процесса суперфинишной ПЦО с вертикальной подачей инструмента при неподвижной заготовке

Исходные параметры заготовок: втулка с внутренним диаметром 100 мм, исходная шероховатость поверхности, полученная роликовым накатником, $Ra = 0,13...0,15$ мкм, наружный диаметр – 120 мм, длина – 150 мм, материал – сталь 45.

Измерение параметра шероховатости Ra обработанных внутренних поверхностей заготовок проводили на профилометре-профилографе мод. 250.

Исследование влияния давления сжатого воздуха P , подводимого к инструменту, на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: подача инструмента $S = 224$ мм/мин, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 22$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт. В результате обработки получена зависимость $Ra = f(P)$ (рисунок 7.2).

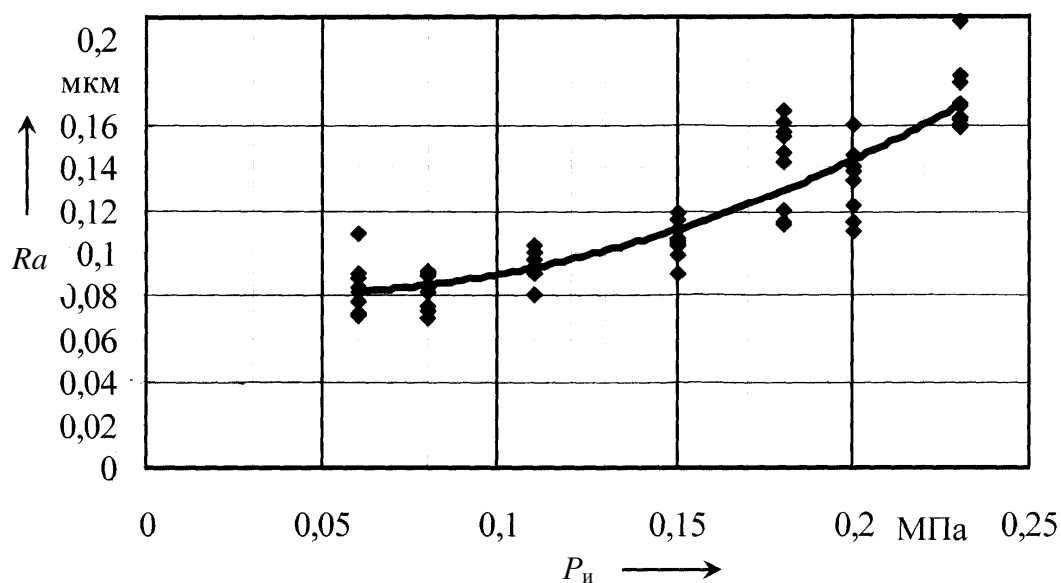


Рисунок 7.2 – График зависимости шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха

График зависимости $Ra = f(P)$ линейный и показывает, что с увеличением давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту, параметр шероховатости обрабатываемой поверхности увеличивается. Для осуществления суперфинишной ПЦО с шероховатостью $Ra \leq 0,1$ мкм необходимо использовать диапазон давлений $P_i = 0,06...0,1$ МПа, наилучшие результаты получены при $P_i = 0,06...0,08$ МПа (шероховатость обработанной поверхности заготовки составила $Ra = 0,06...0,08$ мкм). Это связано с тем, что при обработке заготовок с малой исходной шерохо-

ватостью ($Ra = 0,11...0,16$ мкм) на малых давлениях происходит лишь сглаживание микрогребешков и заполнение металлом микропадин поверхности.

Исследование влияния подачи инструмента S на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента, $P_{и} = 0,08$ МПа, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 22$ шт., число сопел $z_{с} = 6$ шт. В результате обработки получена зависимость $Ra = f(S)$ (рисунок 7.3).

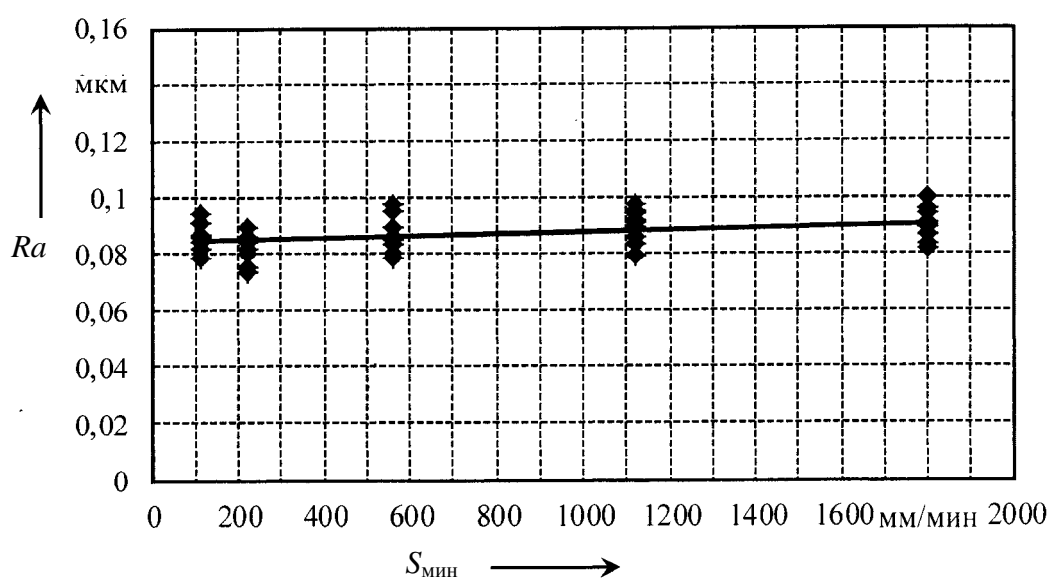


Рисунок 7.3 – График зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента

График зависимости $Ra = f(S)$ линейный и показывает, что увеличение минутной подачи со 100 до 1800 мм/мин не влияет на качество обработанной поверхности заготовок (шероховатость обработанной поверхности заготовки $Ra = 0,08...0,09$ мкм).

Суперфинишная ПЦО с вертикальной схемой перемещения инструмента при неподвижной заготовке и суперфинишная ПЦО с горизонтальной схемой перемещения инструмента при вращающейся заготовке показали аналогичные результаты по качеству обработанной поверхности.

Это позволяет рекомендовать применение суперфинишной ПЦО в массовом и серийном производствах с использованием, например, технологических роторных машин и агрегатных станков с вертикальной

подачей инструмента при неподвижной заготовке, что даст возможность повысить производительность и снизить затраты на электроэнергию. Энергоемкость процесса суперфинишной ПЦО при вертикальной схеме обработки составит 1,2 кВт, что в 10...17 раз меньше, чем при хонинговании отверстий гильз для получения такой же шероховатости поверхности, что соответствует лучшим европейским уровням и превосходит их.

7.2 Технологические возможности процесса суперфинишной ПЦО с вращением заготовки

Исследования проведены в цехах и лабораториях АО «Могилевский завод «Строммашина» и цеховых условиях МоАЗ на универсальных токарно-винторезных станках мод. 1К62, 16К20 (рисунок 7.4). В качестве инструмента использовался шариковый накатник пневмоцентробежного действия, основные характеристики которого приведены в таблице 7.1, а упрощенная конструктивная схема изображена на рисунке 7.5.

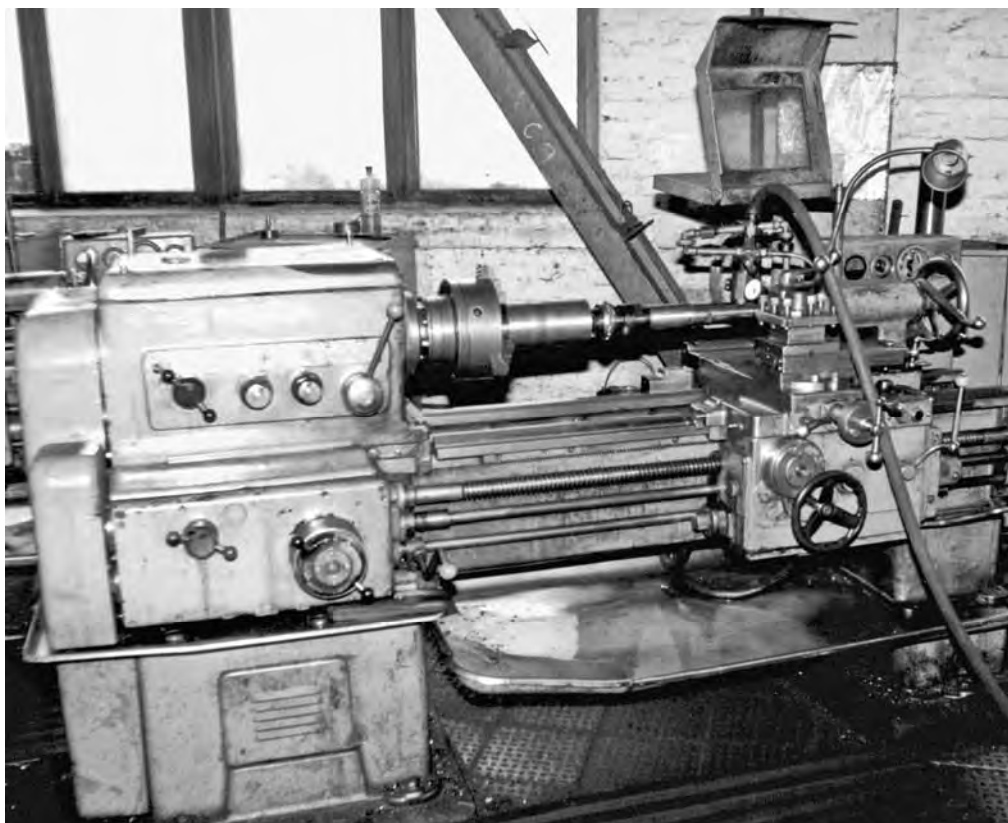
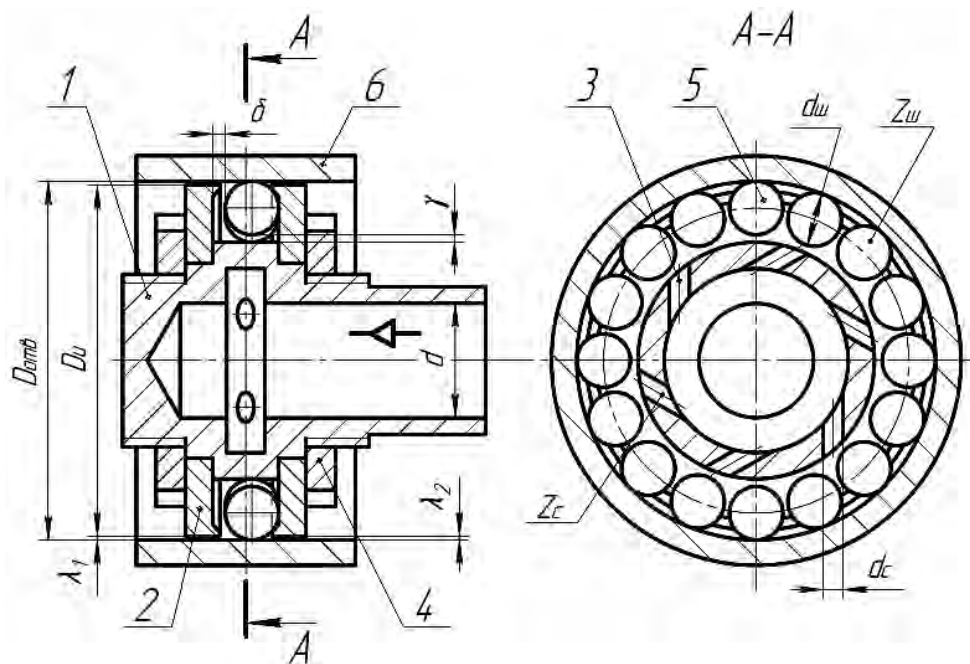


Рисунок 7.4 – Оснащение процесса суперфинишной ПЦО внутренних цилиндрических поверхностей с вращением заготовки



1 – корпус; 2 – диск; 3 – сопла; 4 – гайка; 5 – шар; 6 – заготовка

Рисунок 7.5 – Конструктивная схема и основные параметры инструмента для суперфинишной ПЦО

Таблица 7.1 – Основные параметры инструмента для суперфинишной ПЦО отверстий диаметром 100 мм

Наименование параметра	Величина
Диаметр обрабатываемого отверстия $D_{\text{отв}}$, мм	100
Наружный диаметр инструмента $D_{\text{и}}$, мм	98,5
Диаметр осевого отверстия инструмента d , мм	20
Диаметр шаров $d_{\text{ш}}$, мм	11,112
Количество рабочих тел – шаров $z_{\text{ш}}$, шт.	22
Диаметр сопел $d_{\text{с}}$, мм	3
Количество сопел $z_{\text{с}}$, шт.	6
Осевой зазор δ , мм	0,1
Зазор для выхода воздуха в атмосферу $\lambda_1 = \lambda_2$, мм	0,75
Радиальный зазор γ , мм	3,89

Заготовка гильзы в процессе исследований закреплялась в трехкулачковом патроне токарно-винторезного станка, в ходе обработки ей придавалось вращательное движение. Инструмент крепился в пиноли

задней бабки станка и перемещался вдоль обрабатываемой заготовки, при этом в осевую полость инструмента посредством подводящей системы осуществлялась подача сжатого воздуха, служащего приводом вращения рабочих тел (шаров).

Для исследования технологических возможностей суперфинишной ПЦО использовались модельные образцы заготовок из сталей 35, 45 (187...196 HB) с размерами: длиной $L = 200...300$ мм, внутренним номинальным диаметром $d_{\text{отв}} = 100$ мм, наружным диаметром $D = 120$ мм; исходная шероховатость поверхности получена жестким роликовым накатником ($Ra_{\text{исх}} = 0,09...0,23$ мкм).

Согласно полученным результатам, исходная шероховатость существенно влияет на качество обработанной поверхности, поэтому следует разбить результаты исследований на ряд диапазонов в зависимости от исходной шероховатости отверстий обрабатываемых заготовок гильз [197].

В качестве модельных образцов заготовок использовались гильзы из нормального ряда размеров ($D_{\text{отв}} = 100$ мм) серийно выпускаемых гидравлических цилиндров, наиболее широко используемых в различных отраслях машиностроения.

Выбор значений и диапазона изменения варьируемых параметров (давление подаваемого к инструменту сжатого воздуха, подача инструмента, частота вращения заготовки) осуществлялся с учетом возможностей технологического оборудования в реальных условиях производства.

Измерение параметра шероховатости Ra обработанных внутренних поверхностей заготовок проводили на профилометре-профилографе мод. 250 в измерительной лаборатории ОАО «Могилевский завод «Строммашина» (рисунок 7.6) и МоАЗ им. С. М. Кирова.

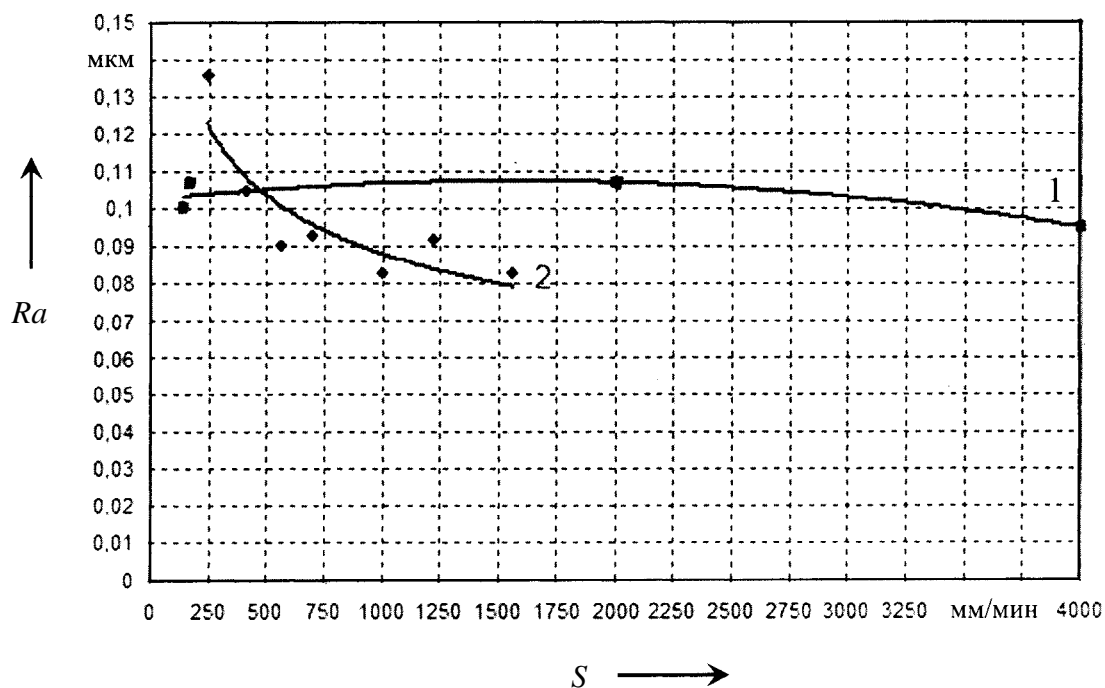
Обработка заготовок с исходной шероховатостью $0,09 \leq Ra < 0,11$ мкм.

Исследование влияния шероховатости поверхности рабочих тел – шаров на шероховатость обработанной поверхности. Проведенные поисковые исследования по обработке отверстий заготовок с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 0,11...0,09$ мкм при давлении сжатого воздуха $P = 0,08$ МПа, частоте вращения заготовки $n = 1000...2000$ мин⁻¹ и попутном направлении вращения шаров и обрабатываемой заготовки показали, что использование для обработки инструмента с шарами из стали ШХ 15 ГОСТ 3722-81 (шероховатость $Ra = 0,08$ мкм и $Ra = 0,04$ мкм, степень точности 40 и 20 соответственно, диаметр 11,112 мм) не позволяет

уменьшить или незначительно снижает шероховатость после обработки. Это подтверждается графиками зависимости $Ra = f(S_{\text{мин}})$ (рисунок 7.7).



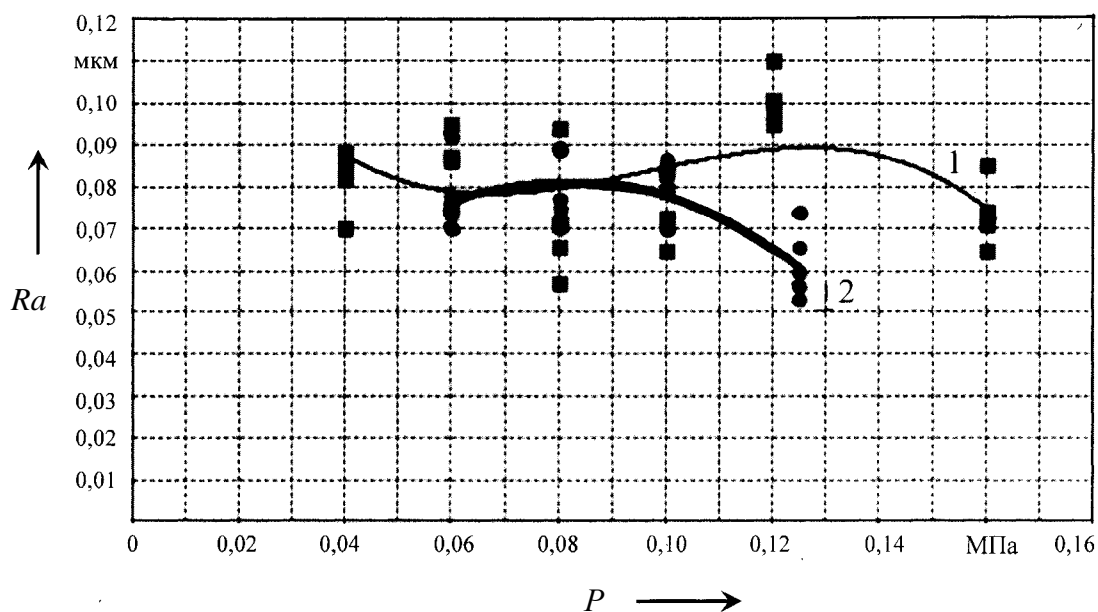
Рисунок 7.6 – Измерение шероховатости на профилометре-профилографе



1 – $P = 0,08$ МПа, $n = 2000$ мин⁻¹, диаметр шара 11,112 мм, $Ra_{\text{шара}} = 0,04$ мкм;
 2 – $P = 0,08$ МПа, $n = 1000$ мин⁻¹, диаметр шара 12,303 мм, $Ra_{\text{шара}} = 0,02$ мкм

Рисунок 7.7 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента

Исследование влияния давления сжатого воздуха на шероховатость обработанной поверхности. Использовался инструмент с шарами диаметром 12,303 мм в количестве 19 шт. шероховатостью $Ra = 0,02$ мкм. Исходная шероховатость поверхности заготовок $Ra = 0,1...0,085$ мкм, направление вращения шаров и обрабатываемой заготовки попутное. Графики зависимости параметра шероховатости обработанной поверхности отверстия заготовок от давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $Ra = f(P)$ представлены на рисунке 7.8.



1 – $S_{\text{мин}} = 7$ мм/мин; 2 – $S_{\text{мин}} = 416$ мм/мин

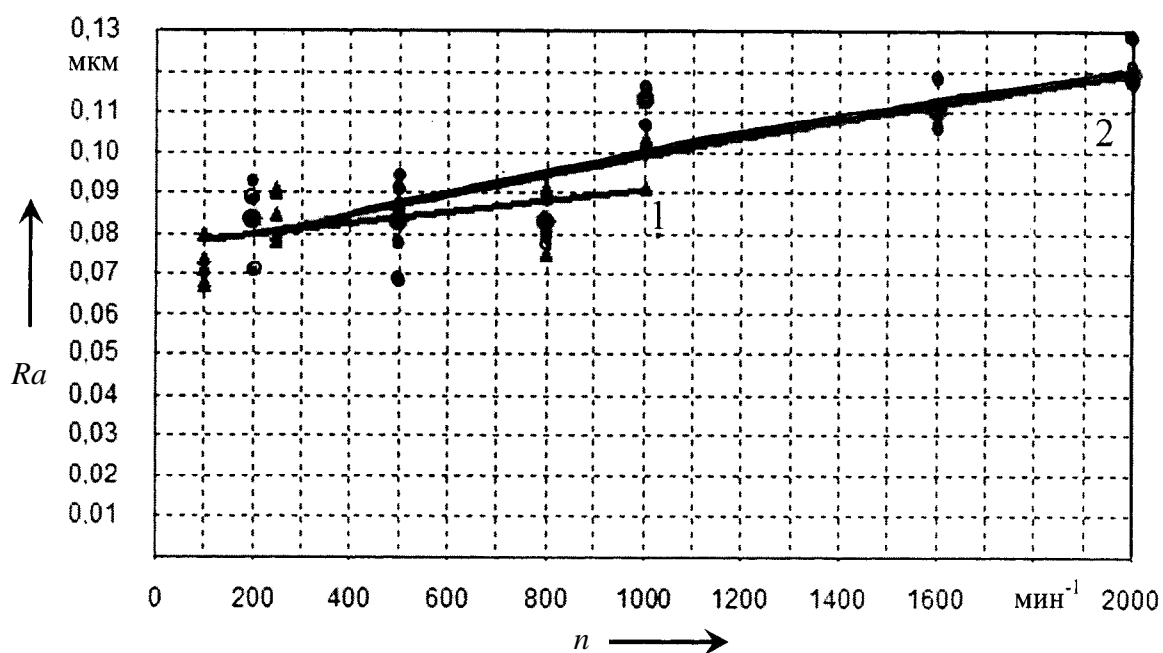
Рисунок 7.8 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту

Уменьшение исходной шероховатости при обработке отверстий заготовок наблюдалось лишь при использовании в инструменте для суперфинишной ПЦО шаров диаметром 12,303 мм с шероховатостью поверхности $Ra = 0,02$ мкм, степенью точности 10. Поэтому все дальнейшие исследования для заготовок с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 0,11...0,075$ мкм в рамках этого подраздела проведены с использованием в инструменте рабочих тел с шероховатостью $Ra = 0,02$ мкм.

Исследования показали, что при увеличении давления сжатого воздуха шероховатость обрабатываемой поверхности снижается, это дает возможность предположить, что для того чтобы уменьшить микро-

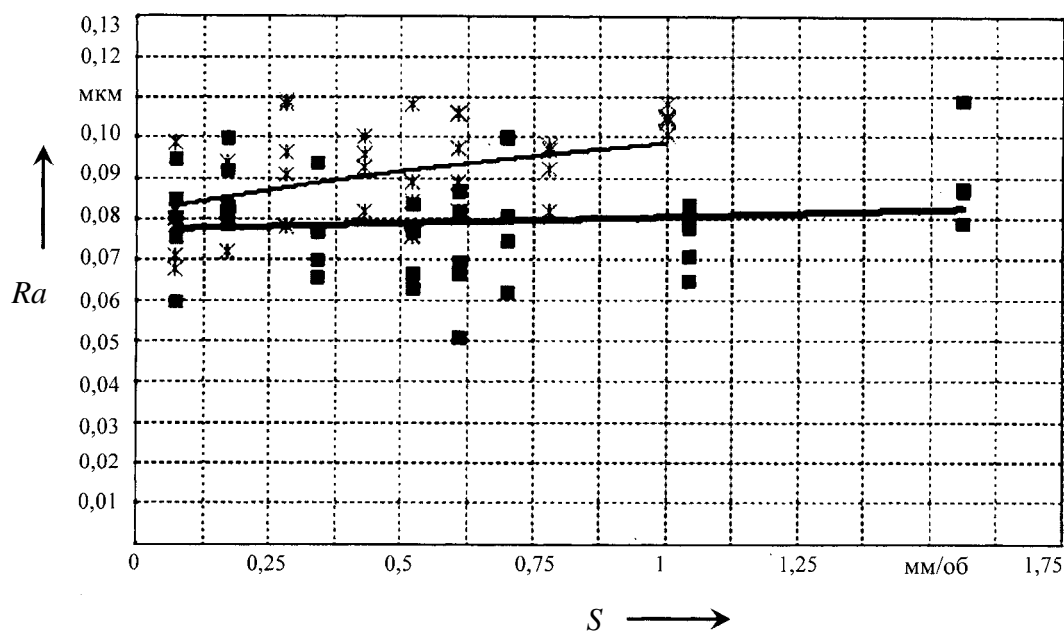
неровности поверхности с низкой исходной шероховатостью, мало использовать шары с шероховатостью $Ra = 0,02$ мкм, необходимо затратить большую работу по смятию микронеровностей поверхности, которая выражается в увеличении силы удара шара и скорости его вращения, а следовательно, и в возрастании давления.

Исследование влияния режимов процесса суперфинишной ПЦО на шероховатость обработанной поверхности. На рисунках 7.9 и 7.10 представлены зависимости параметра шероховатости обработанной внутренней поверхности заготовок гильз от частоты вращения заготовки $Ra = f(n)$ и подачи инструмента $Ra = f(s)$. Условия проведения эксперимента для каждой пронумерованной кривой приведены в подрисуночной надписи. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности для всех вариантов была в диапазоне $Ra = 0,095 \dots 0,085$ мкм, направление вращения шаров и обрабатываемой заготовки попутное, шероховатость поверхности шара $Ra = 0,02$ мкм.



1 – $S_{об} = 1,4$ мм/об, $P = 0,1$ МПа; 2 – $S_{об} = 0,52$ мм/об, $P = 0,06$ МПа

Рисунок 7.9 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от частоты вращения обрабатываемой заготовки



1 – $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,12 \text{ МПа}$; 2 – $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,08 \text{ МПа}$

Рисунок 7.10 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента

Анализ графиков показывает, что с увеличением частоты вращения заготовки шероховатость обработанной поверхности возрастает. Наилучшим вариантом для обработки является частота вращения до 600 мин^{-1} . В данном диапазоне шероховатость обработанной поверхности гильзы незначительно снижается.

При варьировании величиной подачи инструмента шероховатость обработанной поверхности снижается в пределах $Ra = 0,09 \dots 0,075 \text{ мкм}$ при давлении $P = 0,1 \dots 0,12 \text{ МПа}$. При этом с увеличением подачи шероховатость поверхности увеличивается, но очень незначительно. При давлении сжатого воздуха $P = 0,08 \dots 0,06 \text{ МПа}$ снижение шероховатости почти невозможно.

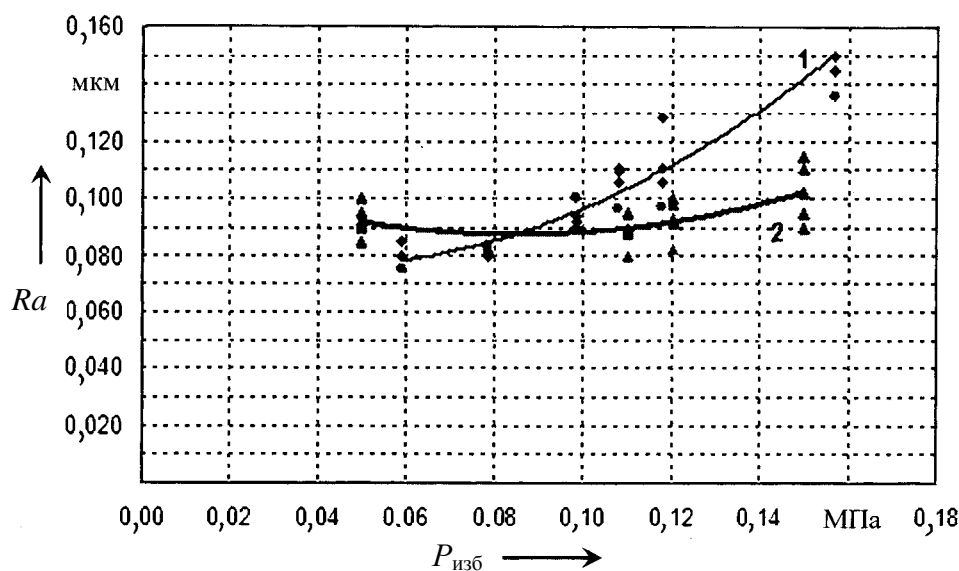
Обработка заготовок с шероховатостью $0,11 < Ra \leq 0,16 \text{ мкм}$.

Наилучшие результаты по обработке упрочненной поверхности отверстия гильз были получены при исходной шероховатости в диапазоне $Ra = 0,16 \dots 0,11 \text{ мм}$, поэтому большое количество исследований проведено именно для этого диапазона.

В ходе исследований имитировались различные варианты режимов обработки, использовались шары с различной шероховатостью, изме-

нялось направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой заготовки, применялись смазывающие материалы.

Исследование влияния давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту для суперфинишной ПЦО, на шероховатость обработанной поверхности. Зависимость параметра шероховатости от давления сжатого воздуха $Ra = f(P)$ для обработанной поверхности представлена на рисунке 7.11. Условия проведения эксперимента: исходная шероховатость поверхности заготовок гильз $Ra = 0,14...0,12$ мкм, направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой заготовки попутное, шероховатость поверхности шара $Ra = 0,04$ мкм, количество шаров – 22 шт.

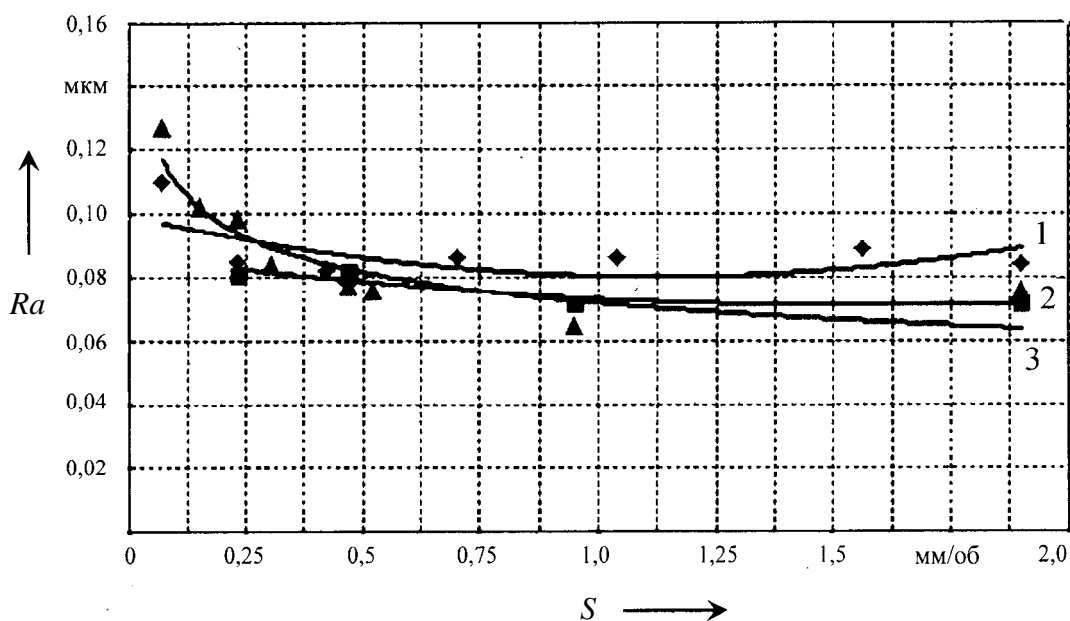


1 – число сопел инструмента – 6 шт., $S_{мин} = 7$ мм/мин; 2 – число сопел инструмента – 4 шт., $S_{мин} = 150$ мм/мин

Рисунок 7.11 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту

Анализ графика показал, что увеличение давления сжатого воздуха ведет к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Использование при обработке малых давлений сжатого воздуха до $P_i = 0,1$ МПа дает возможность получать шероховатость обработанной поверхности менее 0,1 мкм. Это свидетельствует о том, что для суперфинишной ПЦО не следует применять больших давлений, которые использовались при упрочняющей ПЦО [44, 45, 94] и которые не всегда имеются на предприятиях.

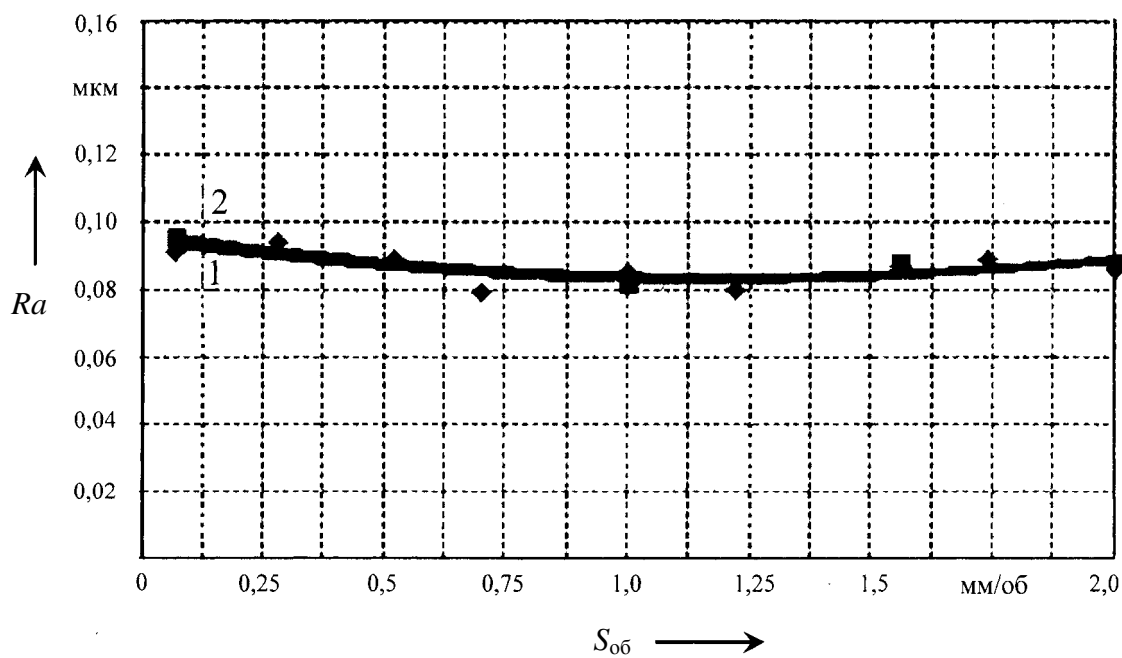
Исследование влияния режимов процесса суперфинишной ПЦО на шероховатость обработанной поверхности. На рисунках 7.12 и 7.13 представлены зависимости параметра шероховатости обработанной поверхности от подачи на оборот $Ra = f(S_{об})$ при применении инструментов с разным количеством сопел. Условия проведения эксперимента: исходная шероховатость поверхности заготовок гильз $Ra = 0,14...0,12$ мкм, направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой заготовки попутное, шероховатость поверхности шара $Ra = 0,04$ мкм, количество шаров – 22 шт.



1 – $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,11 \text{ МПа}$; 2 – $n = 250 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,12 \text{ МПа}$; 3 – $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,15 \text{ МПа}$

Рисунок 7.12 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи на оборот (инструмент с четырьмя соплами)

На рисунке 7.14 представлена зависимость шероховатости обработанной поверхности от минутной подачи инструмента, позволяющая судить о производительности процесса суперфинишной ПЦО. Условия проведения эксперимента: количество сопел инструмента – 6 шт., давление сжатого воздуха $P = 0,08 \text{ МПа}$, частота вращения заготовки $n = 800...1000 \text{ мин}^{-1}$, остальные условия те же, что для зависимостей, представленных на рисунках 7.12 и 7.13.



1 – $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,08 \text{ МПа}$; 2 – $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,06 \text{ МПа}$

Рисунок 7.13 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи на оборот (инструмент с шестью соплами)

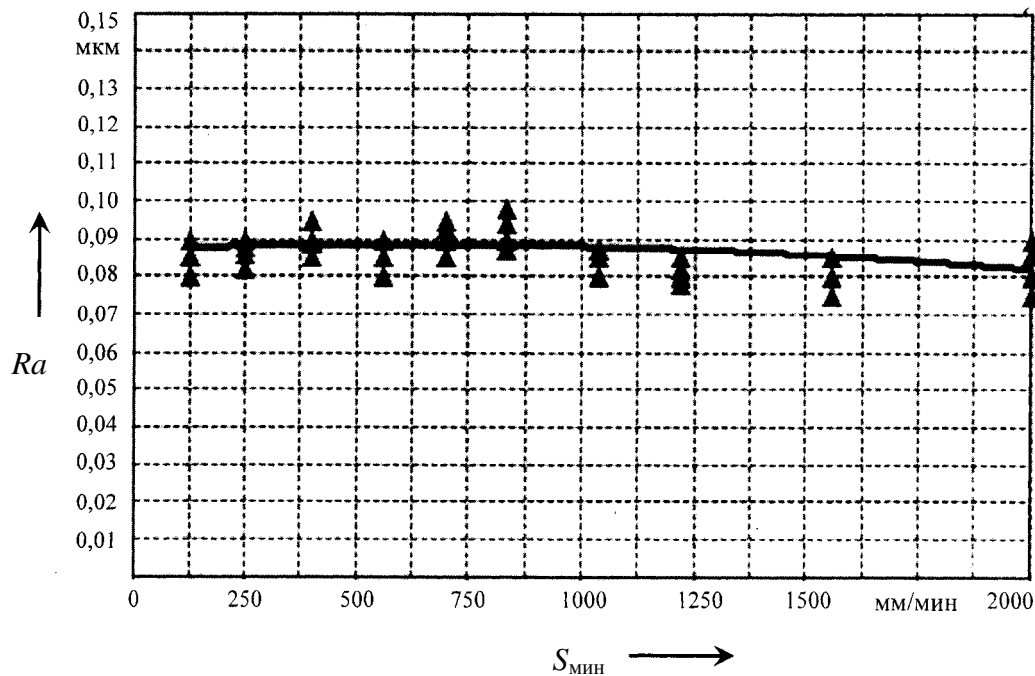


Рисунок 7.14 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от минутной подачи

Анализ графиков показал, что при варьировании подачи инструмента шероховатость обработанной поверхности колеблется в пределах $Ra = 0,07...0,095$ мкм. Величина подачи существенного влияния на шероховатость поверхности не оказывает. Наименьшая шероховатость поверхности достигается при подачах инструмента 0,52; 0,7; 1,9; 2 мм/об. Хорошие и стабильные результаты отмечены при обработке с подачей $S_0 = 2$ мм/об, что позволяет осуществлять суперфинишную ПЦО с производительностью до 2000 мм/мин и при этом обеспечивать шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,08$ мкм.

На рисунке 7.15 представлена зависимость шероховатости обработанной внутренней поверхности от частоты вращения заготовки $Ra = f(n)$. Условия проведения эксперимента: исходная шероховатость поверхности заготовок гильз $Ra = 0,13...0,11$ мкм, направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой заготовки попутное, шероховатость поверхности шара $Ra = 0,04$ мкм, количество шаров – 22 шт., количество сопел инструмента – 6 шт., давление сжатого воздуха $P = 0,08$ МПа, подача на оборот $S_{об} = 0,52$ мм/об.

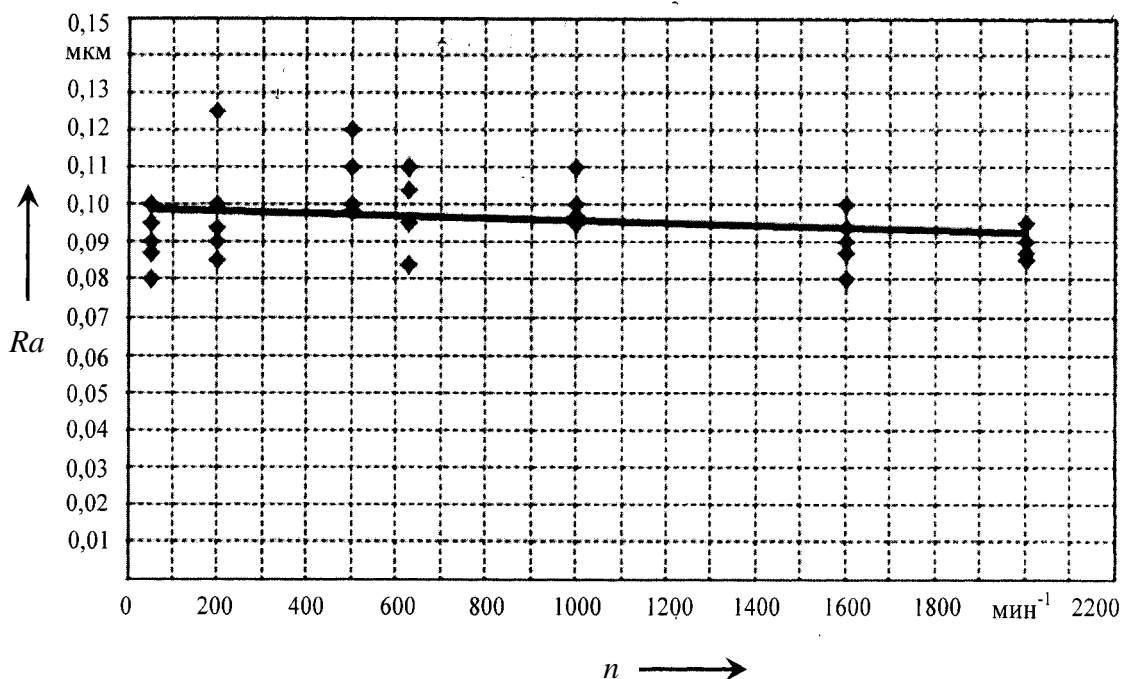


Рисунок 7.15 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от частоты вращения заготовки

Анализ графика зависимости показал, что шероховатость обработанной поверхности при варьировании частотой вращения заготовки от

$n = 50 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$ колеблется в пределах $Ra = 0,085 \dots 0,105 \text{ мкм}$. Наименьшая шероховатость поверхности достигается при частоте вращения заготовки в двух диапазонах: $n < 200 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1600 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$.

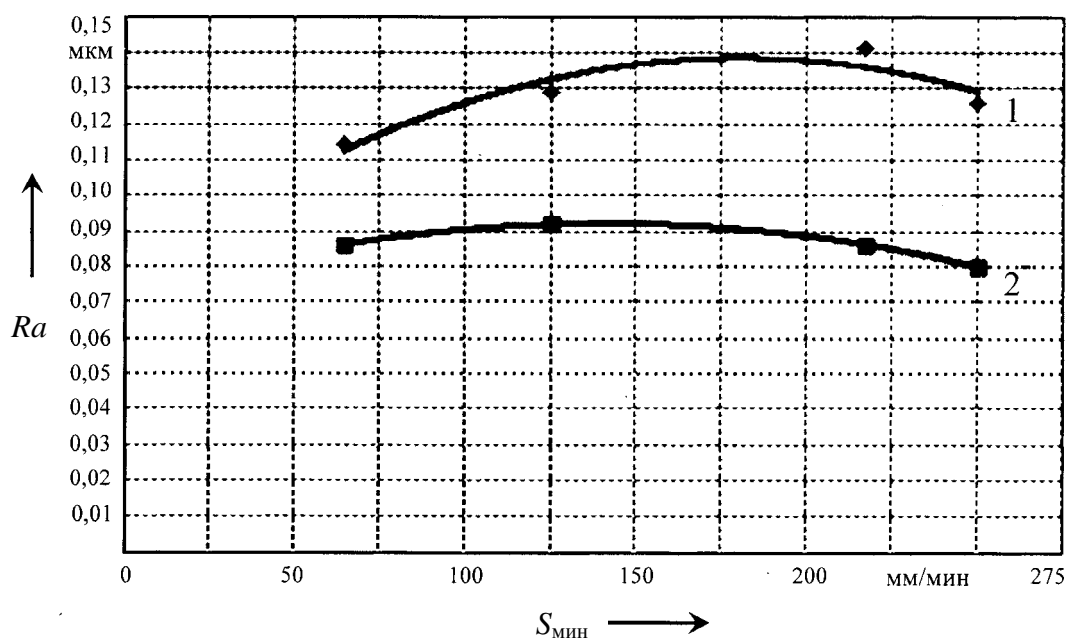
Исследования процесса суперфинишной ПЦО показали, что наилучший результат обработки достигается при режимах процесса $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, $S_o = 2 \text{ мм/об}$, $P_{и} = 0,08 \text{ МПа}$ (шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,065 \dots 0,08 \text{ мкм}$), наибольшая производительность ($S_{\text{мин}} = 2000 \text{ мм/мин}$) – при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $S_o = 1 \text{ мм/об}$, $P_{и} = 0,08 \text{ МПа}$ (шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,08 \dots 0,09 \text{ мкм}$). Поэтому данные режимы были рекомендованы для внедрения суперфинишной ПЦО на производстве.

Исследование влияния направления вращения шаров и обрабатываемой заготовки на шероховатость обработанной поверхности. При встречном вращении шероховатость обработанной поверхности не изменялась по сравнению с исходной шероховатостью или увеличивалась. Попутное вращение привело к снижению шероховатости внутренней поверхности заготовки $Ra < 0,1 \text{ мкм}$, поэтому все исследования проведены при попутном вращении шаров и заготовки.

Исследование влияния шероховатости поверхности деформирующих шаров на шероховатость обработанной поверхности. Исследования проводили для двух разных вариантов обработки. Применяли стандартные шары ГОСТ 3722-81 из стали ШХ 15. Число шаров в инструменте – 22, диаметр шара – 11,112 мм, при проведении экспериментов эти параметры не изменялись. При первом варианте обработки в инструмент помещали шары с шероховатостью поверхности $Ra = 0,125 \text{ мкм}$, степенью точности 100, при втором варианте – шары с шероховатостью $Ra = 0,04 \text{ мкм}$, степенью точности 20. Зависимость параметра шероховатости обрабатываемой поверхности от подачи инструмента для двух вариантов обработки представлена на рисунке 7.16.

Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха $P = 0,08 \text{ МПа}$, частота вращения заготовки $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности $Ra = 0,12 \dots 0,13 \text{ мкм}$, направление вращения деформирующих шаров и обрабатываемой заготовки попутное.

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что использование для обработки шаров с шероховатостью $Ra = 0,125 \text{ мкм}$ результатов не дает, шероховатость исходной поверхности или не изменяется, или увеличивается. Использование для суперфинишной ПЦО шаров с шероховатостью $Ra = 0,04 \text{ мкм}$ дает стабильное получение шероховатости поверхности гильзы менее $0,1 \text{ мкм}$.



1 – $Ra_{\text{шара}} = 0,125$ мкм, степень точности 100; 2 – $Ra_{\text{шара}} = 0,04$ мкм, степень точности 20

Рисунок 7.16 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от минутной подачи

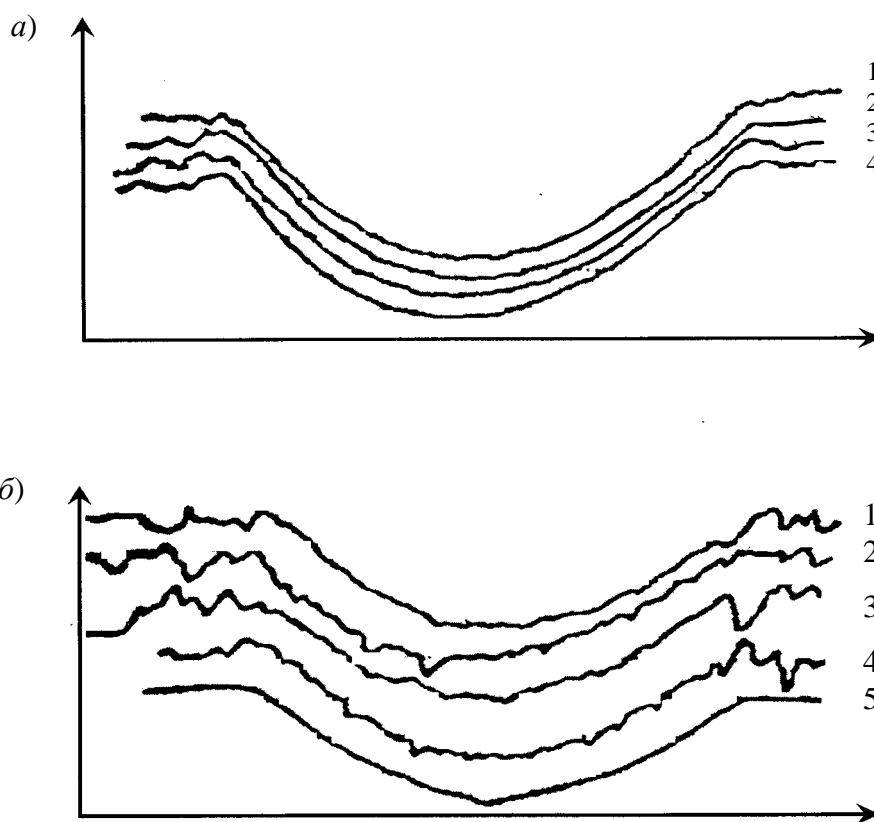
Исследование влияния использования фторопластовых дисков для боковых поверхностей кольцевой камеры инструмента. Условия проведения эксперимента: работа инструмента с фторопластовыми дисками была исследована в широком диапазоне давлений, подач и скоростей вращения шаров, а именно: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента, $P = 0,06 \dots 0,4$ МПа, подача $S = 7 \dots 4000$ мм/мин. Шероховатость поверхности шаров, контактировавших с поверхностью фторопластовых дисков, колебалась в диапазоне $Ra = 0,02 \dots 0,125$ мкм.

Результаты: период, в течение которого использовались фторопластовые диски без их смены на новые, составляет 6 лет. Применение фторопластовых дисков для боковых поверхностей кольцевой камеры инструмента позволяет увеличить скорость рабочих тел – шаров, при этом износ шаров замедляется. Это связано с меньшим коэффициентом трения в паре сталь-фторопласт (0,04...0,06), чем в паре сталь по стали (0,22).

Исследование влияния использования смазки при суперфинишной ПЦО на шероховатость обработанной поверхности. В эксперименте использовали масло индустриальное. В ходе исследований обрабатываемую поверхность заготовок гильз смазывали маслом и производили

суперфинишную ПЦО. Шероховатость поверхности обработанной заготовки при использовании масла оказалась грубее, чем при обработке без применения масла. То есть применение при обработке индустриального масла для смазки поверхности заготовок не позволяет снижать шероховатость обработанной поверхности.

Это подтверждается и исследованиями, согласно которым при ударе шарика о сухую шероховатую поверхность отпечатки имеют вид гладкой чистой сферы без шероховатостей вследствие деформации и смятия микронеровностей (рисунок 7.17) [17].



a – статическое вдавливание шарика в поверхность; *б* – при ударе; 1 – сухая поверхность; 2 – смазанная маслом МС-20; 3 – смазанная глицерином; 4 – смазанная маслом М-8В1; 5 – полированная, смазанная поверхность

Рисунок 7.17 – Профилограммы отпечатков шарика

При ударе шара о поверхность, покрытую слоем масла или глицерина, микронеровности в значительной степени сохраняются, и сфера отпечатка имеет весьма высокую шероховатость. При этом радиус сферы отпечатка в 1,5 раза больше радиуса шарика и на 20...25 % больше радиуса сферы при статическом вдавливании. Радиус сферы отпечатка заметно

увеличивается с повышением шероховатости поверхности образца, а на полированной поверхности отпечаток приобретает характерный вид конуса с острым углом при вершине.

Все это объясняет сравнительно высокую шероховатость отпечатков при ударе шарика о смазанную поверхность, т. к. при ударе сохраняется слой смазки в зоне кратковременного контакта, повышается вязкость при высоком давлении, а также деформируется материал под поверхностным слоем вследствие повышения динамического предела пластической деформации микронеровностей.

Обработка заготовок с исходной шероховатостью $0,16 < Ra < 0,25$ мкм.

Исследование влияния осевого зазора δ на шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra . Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента $P = 0,23$ МПа, подача инструмента $S_{об} = 1$ мм/об, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,125$ мкм, число шаров $z_{ш} = 20$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,2 \dots 0,22$ мкм.

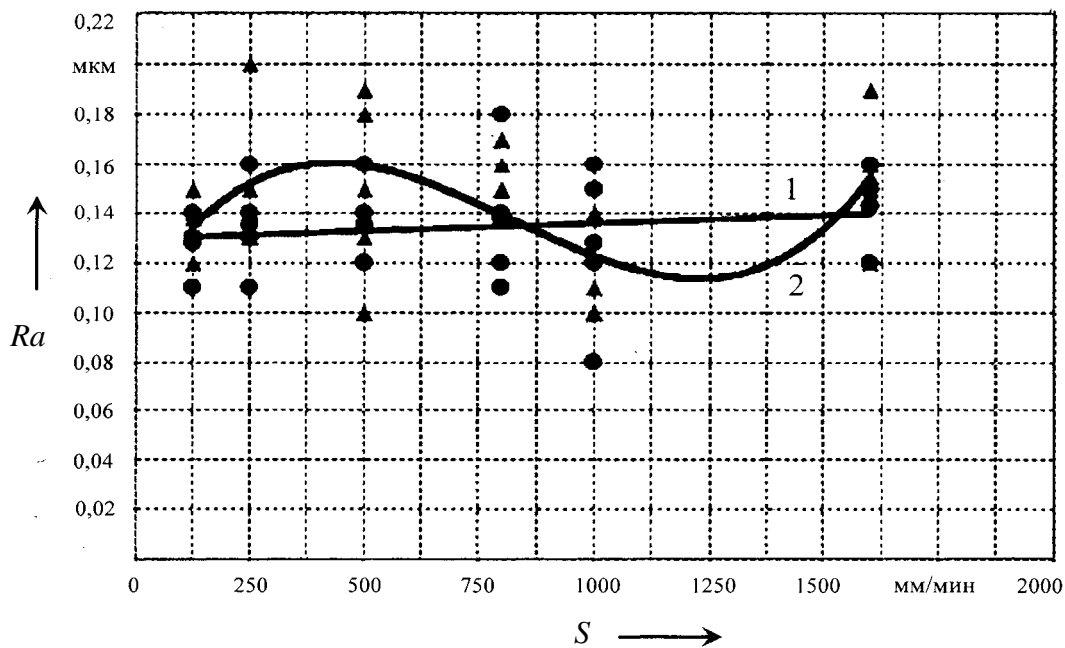
В результате получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от минутной подачи $Ra = f(S)$ при различных осевых зазорах (рисунок 7.18).

Условия проведения эксперимента: подача инструмента $S = 700$ мм/мин, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 21$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,2 \dots 0,22$ мкм.

В результате получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от давления $Ra = f(P)$ при различных осевых зазорах (рисунок 7.19).

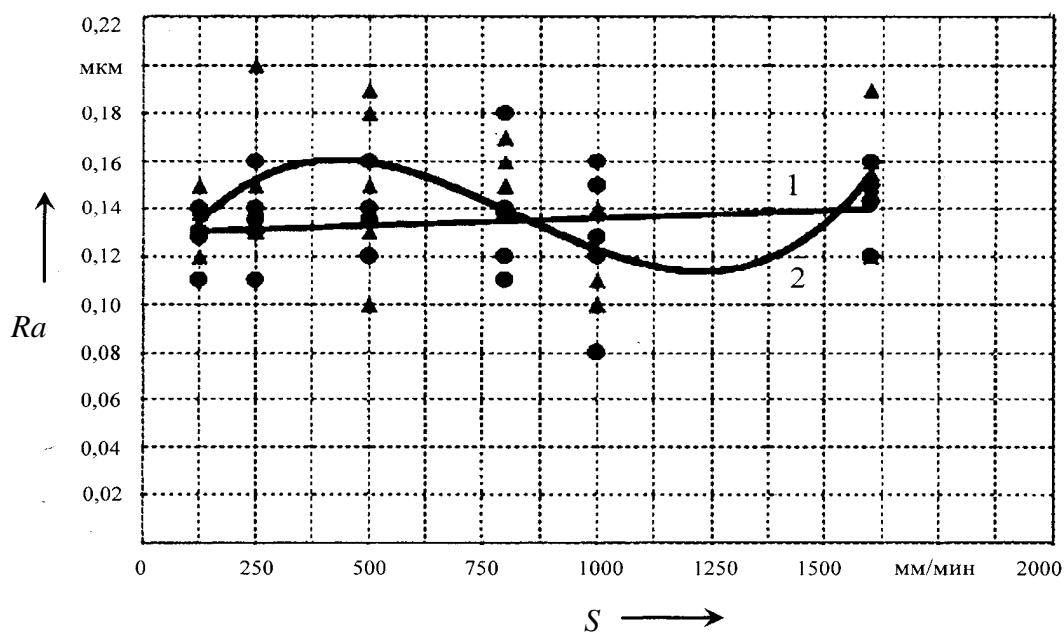
Представленные графики зависимости показали, что в тех случаях, когда осевой зазор меньше, график описывается линейной зависимостью, наблюдается стабильное увеличение или уменьшение шероховатости. При увеличении зазора график описывается сложной полиномиальной зависимостью. При этом значения параметра шероховатости Ra обработанной поверхности то увеличиваются, то уменьшаются.

Это объясняется тем, что при малом осевом зазоре, стремящемся к нулю, шар не имеет колебательного движения вдоль камеры расширения инструмента, при этом траектория его движения стремится к ровной прямой линии.



1 – осевой зазор $\delta = 0,09$ мм; 2 – осевой зазор $\delta = 0,4$ мм

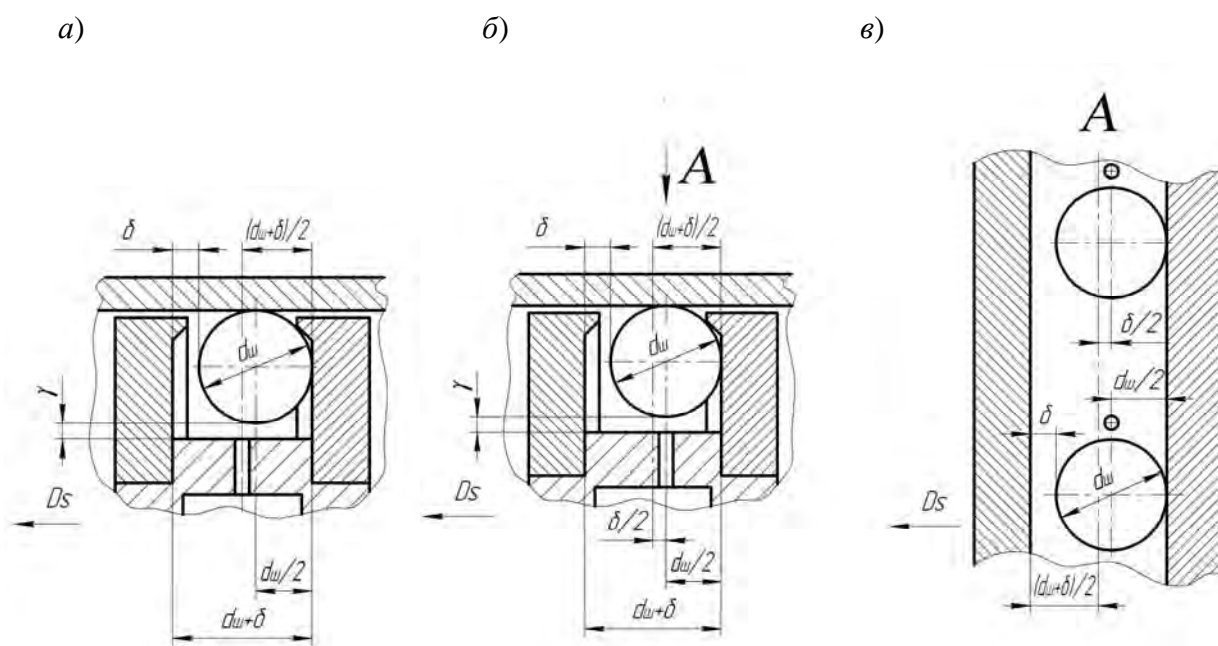
Рисунок 7.18 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от минутной подачи при шероховатости шаров $Ra = 0,125$ мкм



1 – осевой зазор $\delta = 0,4$ мм; 2 – осевой зазор $\delta = 0,3$ мм

Рисунок 7.19 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления при шероховатости шаров $Ra = 0,04$ мкм

Исследование влияния смещения сопел от оси симметрии кольцевой камеры на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Была исследована работа двух сопловых колец инструмента. В одном кольце сопла выполнены со смещением относительно оси симметрии кольцевой камеры в направлении, совпадающем с перемещением инструмента относительно заготовки на величину, равную половине осевого зазора (0,2 мм) (рисунок 7.20, б и в). Второе сопловое кольцо выполнено без смещения сопел, они находятся на оси симметрии кольцевой камеры (рисунок 7.20, а).

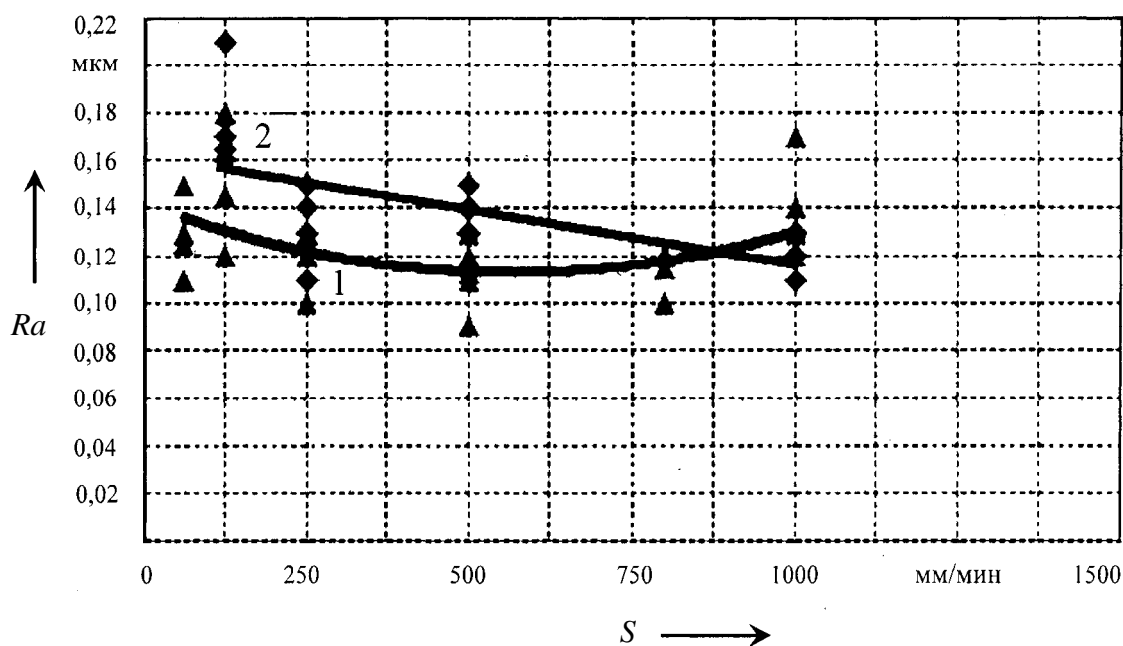


а – сопла выполнены без смещения; б – сопла смещены на величину, равную половине осевого зазора; в – развертка камеры расширения

Рисунок 7.20 – Увеличенное изображение камеры расширения с шарами

Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента, $P = 0,25 \dots 0,28$ МПа, подача инструмента $S_{об} = 1$ мм/об, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 21$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,18 \dots 0,2$ мкм.

Результаты: получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от смещения сопел $Ra = f(S)$ при двух вариантах соплового кольца (рисунок 7.21).



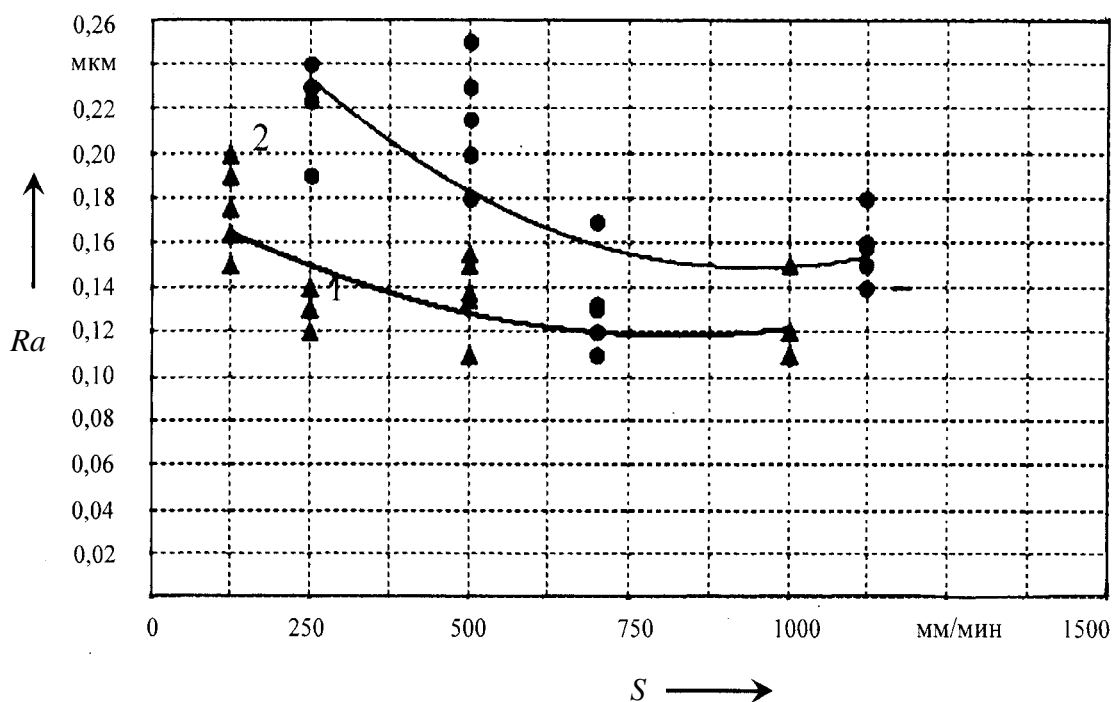
1 – сопла смещены на величину, равную половине осевого зазора (0,2 мм); 2 – сопла не смещены, находятся на оси симметрии кольцевой камеры

Рисунок 7.21 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от смещения сопел при шероховатости шаров $Ra = 0,04$ мкм

Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента, $P = 0,25$ МПа, подача инструмента $S_{об} = 0,7...1$ мм/об, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,125$ мкм, число шаров $z_{ш} = 20$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,18...0,2$ мкм.

Результаты: получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от смещения сопел $Ra = f(S)$ при двух вариантах соплового кольца (рисунок 7.22).

Рассматривая представленные графические зависимости, можно отметить, что при равных условиях при шероховатости шаров как $Ra = 0,04$ мкм, так и $Ra = 0,125$ мкм шероховатость обработанной поверхности получается немного меньше в случае, когда сопла имеют смещение относительно оси симметрии кольцевой камеры в направлении, совпадающем с перемещением инструмента относительно заготовки на величину, равную половине осевого зазора.



1 – сопла смещены на величину, равную половине осевого зазора (0,2 мм); 2 – сопла не смещены, находятся на оси симметрии кольцевой камеры

Рисунок 7.22 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от смещения сопел при шероховатости шаров $Ra = 0,125$ мкм

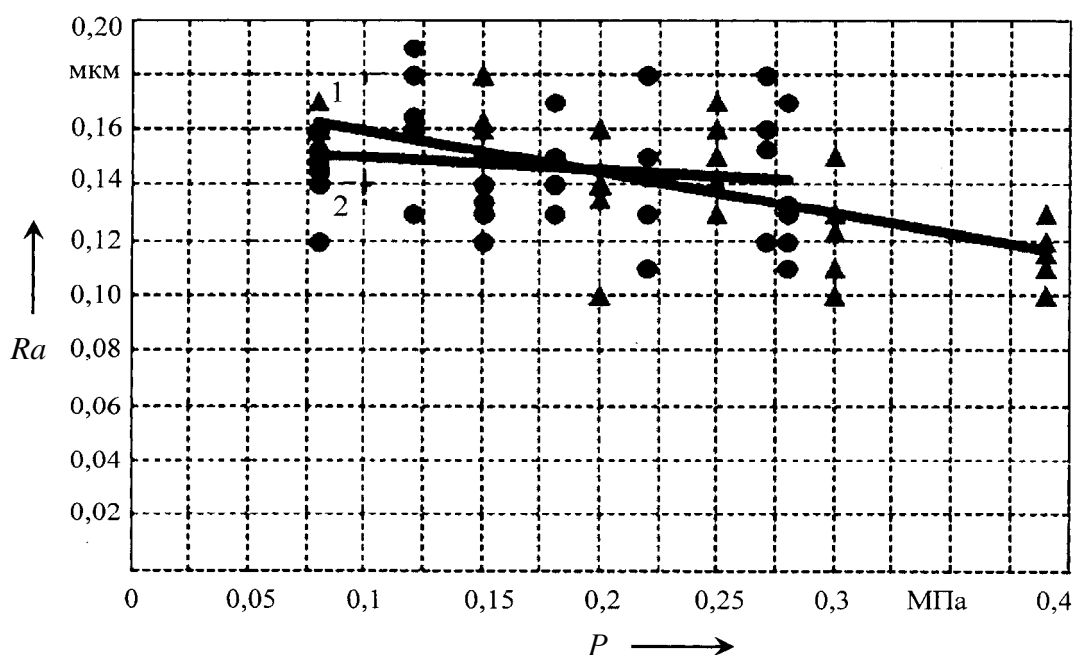
Это связано с тем, что при осевом перемещении инструмента относительно заготовки шары смещаются в направлении, противоположном перемещению инструмента, и прижимаются к боковой поверхности дисков инструмента. Поэтому если сопла расположены на оси симметрии кольцевой камеры (см. рисунок 7.20, а) без смещения, то струи воздуха, выходящие из таких сопел, оказывают дополнительное прижимающее усилие на шары, что приводит к возрастанию силы трения между ними и боковой поверхностью диска, а следовательно, и к снижению скорости шаров.

Струи сжатого воздуха из сопел, которые смещены на величину, равную половине осевого зазора, действуют на шары в сечении большого радиуса, соответственно сообщают деформирующим шарам максимальную скорость и не создают дополнительного прижимающего усилия деформирующих шаров к боковой поверхности кольцевой камеры (см. рисунок 7.20, б). Это приводит к уменьшению силы трения между шарами и боковой поверхностью кольцевой камеры и, соответственно, к

увеличению стойкости шаров и боковой поверхности кольцевой камеры, а также к увеличению скорости шаров и к повышению производительности.

Исследование влияния числа сопел на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: подача инструмента $S_{об} = 0,7$ мм/об, частота вращения заготовки $n = 1000$ мин⁻¹, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 21$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,2$ мкм.

Результаты: получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от числа сопел $Ra = f(P)$ (рисунок 7.23).



1 – инструмент с одним соплом; 2 – инструмент с шестью соплами

Рисунок 7.23 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от числа сопел

Построение графиков зависимости начинается с давления $P = 0,06$ МПа, т. к. только при таком давлении шары начинают вращаться в инструменте. Для случая с шестью соплами график заканчивается на величине давления $P = 0,28$ МПа, т. к. большего в системе не имелось. При использовании инструмента с одним соплом максимально достигаемое давление удалось зафиксировать на уровне $P = 0,39$ МПа, поскольку площадь сечения струи воздуха, подводимого к шарам, уменьшилась, а следовательно, возрос перепад давлений в камере расширения и осевой полости инструмента.

На графике отражена линейная зависимость снижения параметра шероховатости обработанной поверхности с увеличением давления сжатого воздуха, подаваемого к инструменту. Следует отметить, что инструмент с одним соплом дает более стабильные значения параметра шероховатости обработанной поверхности (меньший разброс получаемых значений, параметр шероховатости по линейной зависимости снижается). При этом поверхность заготовки получается гладкой, ровной, на ней нет полос и лунок, которые имели место в некоторых случаях обработки при использовании инструмента с шестью соплами. Это подтверждается законами термодинамики об истечении газов [195]. Воздух, попадая в сопло, встречает на своем пути резкое сужение сечения канала, при этом скорость потока воздуха на выходе из сопла резко возрастает, возникает завихрение. Такая струя резко ударяет по шарам, находящимся в кольцевой камере инструмента, приводя их в движение. Как только шар попадает в пространство над соплом, он мгновенно получает удар струей воздуха, ускоряется, ударяет соседний шар и так далее. Таким образом, в камере расширения устанавливается неравномерное движение шаров. При этом чем большее количество сопел имеет инструмент, тем большее количество струй резко бьет по шарам, делая их движение все более и более неравномерным.

Исследование влияния давления сжатого воздуха P , подводимого к инструменту, на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: подача инструмента $S = 700$ мм/мин, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04$ мкм, число шаров $z_{ш} = 21$ шт., число сопел $z_c = 1$ шт., исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,203$ мкм.

Результаты: получена зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха $Ra = f(P)$ (рисунок 7.24). График зависимости линейный и показывает, что снижение параметра шероховатости происходит с повышением давления воздуха, подводимого к инструменту. Данная зависимость справедлива для исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra = 0,17...0,23$ мкм. При исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra = 0,11...0,16$ мкм зависимость $Ra = f(P)$ изменяется, т. е. при увеличении давления происходит увеличение параметра шероховатости обработанной поверхности.

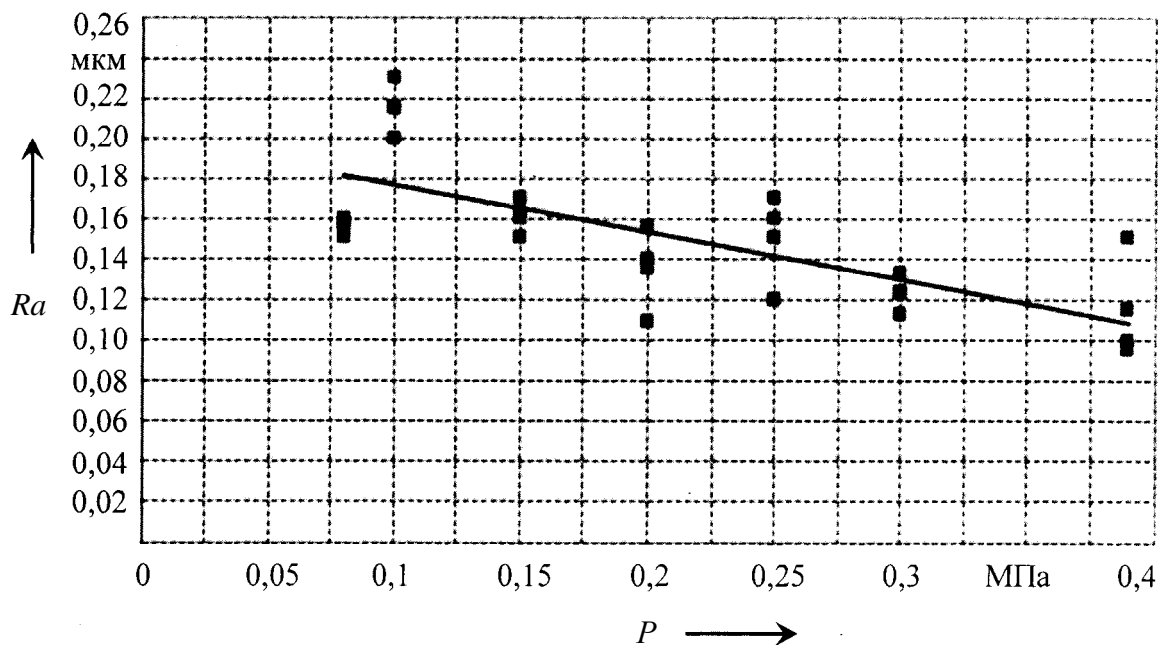


Рисунок 7.24 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от давления сжатого воздуха

Объясняется это тем, что при обработке заготовок с малой исходной шероховатостью ($Ra = 0,11...0,16$ мкм) при малых давлениях происходят лишь сглаживание микрогребешков и заполнение микровпадин поверхности, а для поверхностей с исходной шероховатостью $Ra = 0,17...0,23$ мкм такого малого давления недостаточно, чтобы снизить шероховатость. В данном случае необходимо приложить намного большее усилие к шару (посредством увеличения давления), чтобы укатать достаточно большие микронеровности и создать новый микрорельеф поверхности (он был замечен при рассмотрении под лупой, в отдельных случаях были видны лунки, оставленные шарами на поверхности). То есть при исходной шероховатости поверхности $Ra = 0,17...0,23$ мкм целесообразнее использовать не суперфинишную ПЦО, а упрочняющую.

Исследование влияния подачи инструмента S на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: давление сжатого воздуха, подводимого к осевому каналу инструмента, $P = 0,23...0,25$ МПа, частота вращения заготовки $n = 250$ мин⁻¹, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,125$ мкм, число шаров $z_{ш} = 20$ шт., число сопел $z_c = 6$ шт., осевой зазор $\delta = 0,4$ мм, исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,2$ мкм.

Результаты: получена зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента $Ra = f(S)$ (рисунок 7.25).

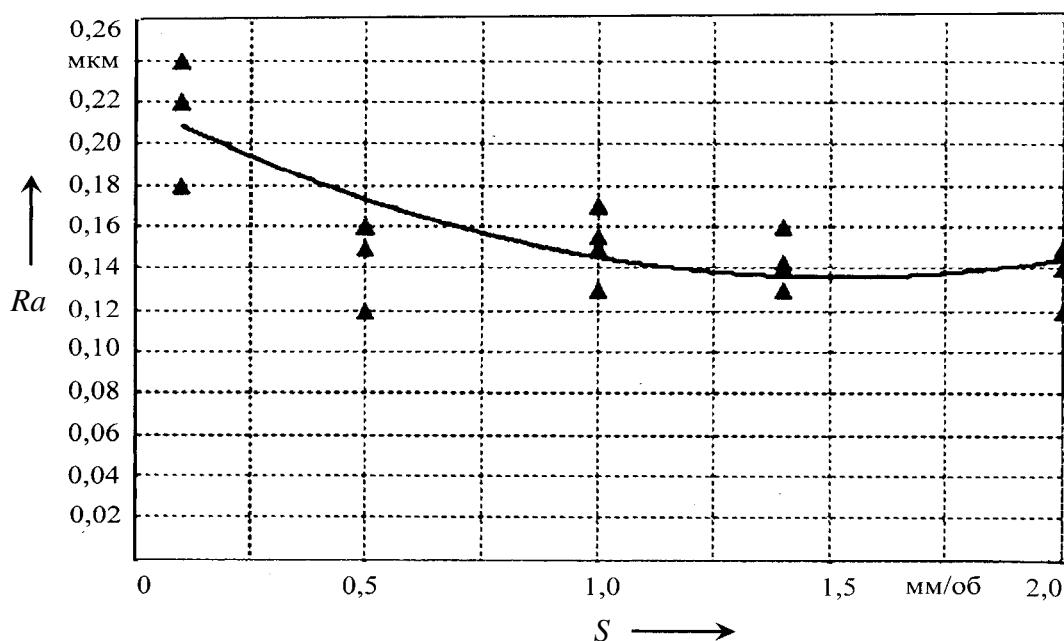


Рисунок 7.25 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента

График зависимости $Ra = f(S)$ при постоянной частоте вращения заготовки $n = 250 \text{ мин}^{-1}$ ограничен подачей $S = 500 \text{ мм/мин}$. Это связано с технологическими возможностями станка, на котором проводились исследования (для данной частоты максимальная подача на оборот, имеющаяся на станке, составляет 2 мм/об).

Согласно полученной зависимости, увеличение величины подачи на оборот влечет уменьшение шероховатости обработанной поверхности. При повышенных подачах шар меньше времени контактирует с обрабатываемой поверхностью и не успевает изменить существенным образом микрорельеф поверхности, он лишь сглаживает микронеровности, и уменьшая таким образом шероховатость.

Исследование влияния числа ходов инструмента на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности. Условия проведения эксперимента: подача инструмента $S = 250 \text{ мм/мин}$, шероховатость поверхности шаров $Ra = 0,04 \text{ мкм}$, число шаров $z_{ш} = 22 \text{ шт.}$, число сопел $z_c = 6 \text{ шт.}$, исходная шероховатость заготовки $Ra = 0,17 \text{ мкм}$.

В ходе эксперимента были прокатаны четыре полосы шириной каждая 15 мм на поверхности заготовки при различном давлении P от 0,08 до 0,2 МПа, затем измерена шероховатость прокатанной поверхности. Затем эти четыре полосы были еще раз прокатаны, но уже при давлении

$P = 0,25$ МПа. Такое давление выбрано в связи с тем, что исходная шероховатость, согласно полученным данным, после первого хода почти не уменьшилась, а наилучшие значения шероховатости были зафиксированы при больших значениях давления. Результаты исследований сведены в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Исследование влияния числа ходов инструмента на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности

Номер прокатанной полосы	Первый проход инструмента		Второй проход инструмента	
	Давление воздуха, подводимого к инструменту, P , МПа	Шероховатость поверхности после ПЦО Ra , мкм	Давление воздуха, подводимого к инструменту, P , МПа	Шероховатость поверхности после ПЦО Ra , мкм
1	0,08	0,24	0,25	0,16
2	0,12	0,16	0,25	0,17
3	0,15	0,14	0,25	0,16
4	0,2	0,13	0,25	0,14

Анализ исследований показал, что второй ход инструмента не снижает шероховатость обработанной поверхности в сравнении с первым ходом, а, наоборот, немного ее увеличивает.

8 Корреляционный анализ шероховатости поверхностей и исследование их эксплуатационных свойств

8.1 Классификация шероховатых поверхностей

Поверхности по своим характеристикам могут различаться. На рисунке 8.1 приведена классификация шероховатых поверхностей по геометрической структуре и характеру профиля.

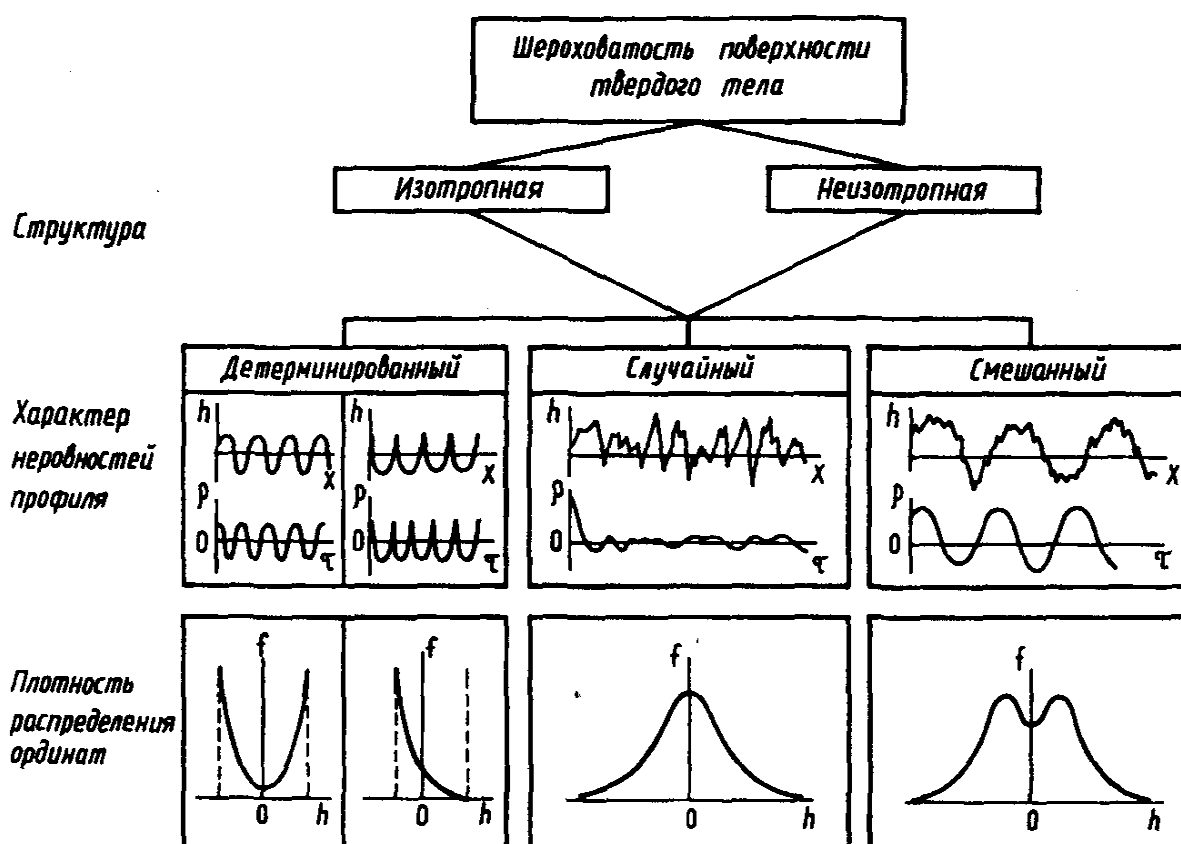


Рисунок 8.1 – Классификация шероховатых поверхностей

На рисунке 8.1 также представлены вид корреляционной функции $p(\tau)$ и плотность вероятностей распределения ординат профиля $f(h)$, которые отражают закономерности изменения шероховатости по длине и высоте. Для изотропной поверхности характерна одинаковая шероховатость по всем направлениям (например, поверхность, полученная виброобкатыванием, с регулярным микрорельефом). В отличие от изотропной поверхности неизотропная описывается четкой направленностью

следов обработки. Это поверхности, полученные фрезерованием, точением, протягиванием. Вместе с тем, поверхности, одинаковые по структуре, могут иметь различный характер неровностей, что видно из профилограмм микрорельефов (см. рисунок 8.1) [161, 162].

Профиль в зависимости от характера неровностей может быть детерминированным, случайным и смешанным. Для детерминированного профиля характерно периодическое сочетание неровностей, мало отличающихся друг от друга. Такой профиль описывается периодической функцией (например, поверхность, полученная точением, виброобкатыванием, с регулярным микрорельефом). Корреляционная функция такого профиля сходна с самим профилем. Плотность распределения ординат зависит от формы профиля. Так, для симметричного профиля она симметрична, для несимметричного – несимметрична (см. рисунок 8.1).

Случайные профили, представляющие вторую группу, характеризуются нерегулярным расположением по высоте и нерегулярным очертанием микронеровностей. Корреляционная функция случайного профиля быстро убывает, что характерно, например, для гидроабразивной обдувки поверхности дробью, доводки поверхности свободным абразивом, пневмовибродинамической обработки и т. д. (см. рисунок 8.1). Плотность распределения ординат шероховатости для профиля со случайным характером близка к нормальной [130].

Группа смешанных профилей образуется при совместном взаимодействии детерминированных и случайных факторов и занимает промежуточное положение между первой и второй группой профилей. Смешанные профили разнообразны по форме, их характер зависит от способа суммирования отдельных составляющих. Корреляционная функция такого профиля в основном имеет незатухающие колебания. Плотность распределения ординат имеет два максимума и более.

Известно, что вибрация представляет собой гармонический процесс с постоянной амплитудой и частотой. Однако в большинстве случаев, в том числе и в процессе ПВДО, автоколебания имеют переменную амплитуду, величина которой в данный момент случайна. Поэтому шероховатость поверхности, обработанной в условиях вибраций, можно рассматривать как совокупность неровностей со случайной амплитудой [14].

8.2 Взаимосвязь между параметрами шероховатости поверхности и эксплуатационными свойствами

Микрогеометрия поверхностей пар трения является одним из решающих факторов, обуславливающих характеристики явлений трения и износа. Различные виды поверхностного взаимодействия твердых тел, твердого тела с газом, жидкостью и плазмой, сопровождающие их явления и взаимосвязь различных эксплуатационных свойств с комплексом параметров шероховатости, в том числе и качественная взаимосвязь различных эксплуатационных характеристик поверхностей с геометрическими параметрами их микрорельефа, рассмотрены в [9, 35, 164].

При выборе технологии изготовления детали, определяемой условиями эксплуатации, точностью обработки и качеством рабочих поверхностей, производительностью, следует руководствоваться тем, что качество поверхности – комплексный показатель, включающий ряд параметров [12, 14, 19, 35].

Технологические и эксплуатационные возможности финишных способов обработки нежестких деталей представлены в таблице 8.1, в которой, наряду с традиционными способами обработки, рассмотрена и пневмоцентробежная.

Оценка эксплуатационных свойств рабочей поверхности по численному значению критерия относительной опорной длины профиля t_p показывает, что этот метод предпочтителен для реализации эффекта избирательного переноса (ИП) [36, 164–166].

Таблица 8.1 – Технологические и эксплуатационные возможности чистовых и отделочных методов обработки нежестких деталей

Способ обработки	Вид поверхности Ra , мкм	Эксплуатационное свойство поверхности	Квалитет ISO	Производительность, мм ² /с
1	2	3	4	5
Развертывание (машинное)	Матовая или блестящая, винтовые риски ($Ra = 0,63...0,16$)	Быстро истирается, подвержена задирам	7...9	95...300
Алмазное выглаживание	Матовая ($Ra = 0,63...0,16$)	Мало истирается	Сохраняется от предшествующей обработки	65...260

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4	5
Шлифование	Блестящая со спиральными или продольными рисками ($Ra = 0,63...0,16$)	Пористая, засоренная абразивной пылью, с разрушенной структурой	5...13	60...330 (наружное), 45...150 (внутреннее)
Хонингование	Блестящая или зеркальная со спиральными перекрещивающимися рисками ($Ra = 0,63...0,04$)	Истирается, быстро теряет зеркальный блеск	6...7	300...500
Тонкое точение	Блестящая или зеркальная с винтовыми рисками ($Ra = 1,25...0,32$)	Истирается, быстро теряет зеркальный блеск	6...9	100...300
Пневмоцентробежная обработка	Матовая, блестящая, зеркальная с перекрещивающимися следами обработки ($Ra = 1...0,05$)	$t_{p20} = 12,6$ % и $t_{p30} = 32$ %, наиболее благоприятны для реализации эффекта безызносности ИП	Сохраняется от предшествующей обработки	85...2300
Доводка-притирка	Блестящая или зеркальная с микроскопическими рисками ($Ra = 0,16...0,02$)	Мало истирается	5	70...140
Суперфиниш	Блестящая или зеркальная, иногда темная ($Ra = 0,16...0,02$)	Мало истирается	5	50...500
Гидрополирование	Матовая без направленных следов обработки ($Ra = 0,16...0,02$)	Мало истирается	Сохраняется от предшествующей обработки	300...500
Электро-механическое сглаживание	Изменяются структура и механические свойства поверхности, твердость повышается в 2...3 раза на глубине слоя 0,1...0,15 мм ($Ra = 0,32...0,16$)	Мало истирается	Сохраняется от предшествующей обработки	100...600

8.3 Финишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка гильз двигателей внутреннего сгорания

В настоящее время в мировой практике технологии машиностроительного производства для финишной обработки гильз ДВС используют различные способы хонингования [26, 35, 198]. Анализ технологий, применяемых для этих целей, показывает, что отечественное производство уступает зарубежному по технико-экономическим показателям. Основными критериями оценки экономичности ДВС являются расход топлива и относительный расход масла на угар, который в соответствии с ГОСТ 18509-88 определяется по формуле [199]

$$g_{\text{м.уг.}} = \frac{\Delta G_{\text{м.уг.}}}{G'_T} \cdot 10^2, \quad (8.1)$$

где $\Delta G_{\text{м.уг.}}$ – изменение массы масла в двигателе за время угарного цикла, кг;

G'_T – расход топлива за время измерения масла на угар, кг.

Например, успешный производитель гильз в Европе – фирма «Кротошин» (Krotoszyn AG, Польша), осуществляющая их поставку для различных легковых и грузовых машин, использует принципиально отличающуюся от отечественной технологию получения заготовки и последующей ее обработки. В результате в заготовке гильзы не наводятся остаточные напряжения, что исключает их релаксацию в процессе эксплуатации, улучшая компрессию ДВС [200]. Заготовки гильз после хонингования подвергают фосфатированию.

Отечественные двигатели мод. Д-245, укомплектованные гильзами фирмы «Кротошин», при тестировании обеспечивают расход масла на угар в зоне работы цилиндропоршневой группы $g_{\text{м.уг.}} \leq 0,2 \%$ (ЕВРО 2), расход топлива 273,2 г/(кВт·ч) [196], в отличие от двигателей, укомплектованных гильзами, обработанными по отечественной технологии, где относительный расход масла на угар в зоне работы цилиндропоршневой группы составляет $g_{\text{м.уг.}} = 0,31 \dots 0,34 \%$ (что превышает евроуровень, но соответствует действующему стандарту [201]), расход топлива равен 275,2 г/(кВт·ч).

Известно, что масляная экономичность ДВС зависит от оптимальной толщины масляной пленки в паре трения гильза – поршневое кольцо, на которую влияет ряд факторов (рисунок 8.2).

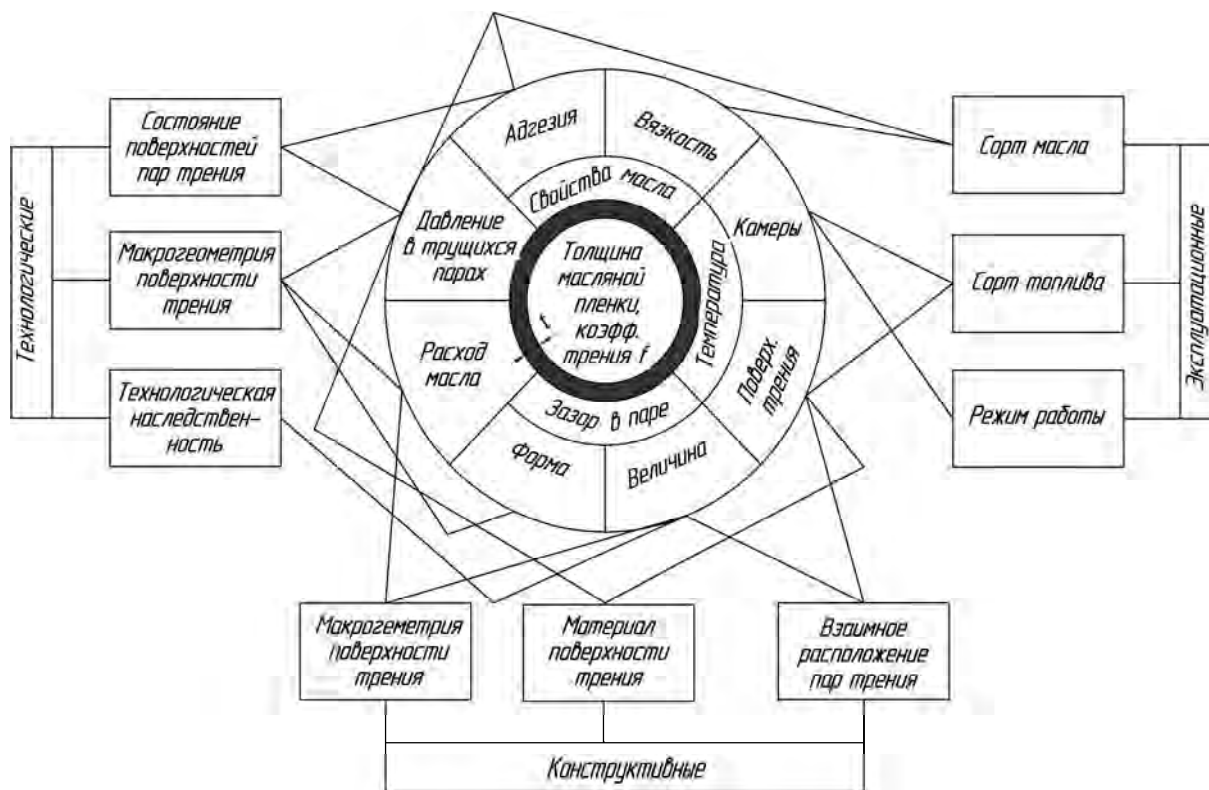


Рисунок 8.2 – Факторы, влияющие на толщину t масляной пленки в паре трения гильза – поршневое кольцо ДВС

Считается, что первостепенное влияние на компрессию двигателя и оптимальную толщину масляной пленки оказывают геометрическая точность гильзы, ее цилиндричность (должна быть в пределах 0,01...0,005 мм) и микрогеометрия поверхности.

Согласно исследованиям [202], оптимальная толщина масляной пленки определяется минимумом коэффициента трения. Доказано, что увеличение коэффициента трения в 1,8 раза повышает интенсивность изнашивания в 6 раз и ведет к повышенному расходу топлива [183, 203]. Поэтому совершенное качество поверхностей, приработка и эффективность смазки оказывают большое влияние на износостойкость пары трения, которая с точки зрения структурно-энергетической теории разрушения (изнашивания) материалов характеризуется четырьмя энергетическими уровнями изнашивания [196].

Для каждого энергетического уровня характерно преобладание определенного вида изнашивания: для первого уровня – абразивного; для второго – усталостного; для третьего – коррозионно-усталостного; для четвертого – коррозионного (нормального окислительного изнашивания).

Установлено, что изменение средней скорости изнашивания тонких поверхностных слоев «зеркала» гильз двигателей и относительные потери энергии на трение соответствуют правилу геометрической прогрессии – износ поверхности «зеркала» гильз возрастает ступенчато по геометрической прогрессии при переходе, что нежелательно, на первый энергетический уровень изнашивания с четвертого, соответствующего условиям изнашивания при гидродинамической смазке и являющегося самым приемлемым в процессе эксплуатации. Необходимо стремиться к тому, чтобы исключить в двигателе переход с одного энергетического уровня изнашивания на другой. Такой переход может происходить за счет технологических, конструктивных или материаловедческих мероприятий при форсировании двигателей по среднему эффективному давлению и по числу оборотов коленвала двигателя, при замене одного сорта топлива или моторного масла на другой, а также ряда других случаев [196, 203].

Наряду с вышеописанным основополагающим условием для удовлетворительной работы пары трения гильза – поршневое кольцо, имеет значение технологическая наследственность [17, 195].

Стремление специалистов решить проблемы повышения износостойкости гильзы и управления маслостойкостью ее поверхности привело к созданию многочисленных нетрадиционных способов финишной обработки поверхностным пластическим деформированием, т. к. ресурс двигателя в значительной степени определяется сроком службы гильз цилиндров [35, 77, 204, 206].

Так, например, виброобкатывание рабочей поверхности гильзы шаром создает на ней смешанный микрорельеф в виде горизонтальных непересекающихся синусоидальных канавок, нанесенных с различной плотностью по высоте гильзы [35]. Результаты испытаний двигателей с вибронакатанными гильзами из различных металлов показали увеличение износостойкости в 1,4...1,8 раза, устранение задиров, натиров и схватывания. Однако, согласно испытаниям на масляную экономичность двигателей, укомплектованных данными гильзами, увеличение маслостойкости рабочей поверхности гильз приводит к повышению расхода масла на угар. Так, при увеличении маслостойкости на 10 % угар масла возрастает в 1,3 раза, на 12 % – в 1,5 раза, на 18 % – в 2,3 раза при полной нагрузке и частоте вращения коленвала 2000...2400 мин⁻¹ двигателя ЗИЛ-645.

Широкому распространению способа виброобкатывания на моторостроительных заводах воспрепятствовала необходимость создания специального оборудования и инструмента – шарикового накатника. Более

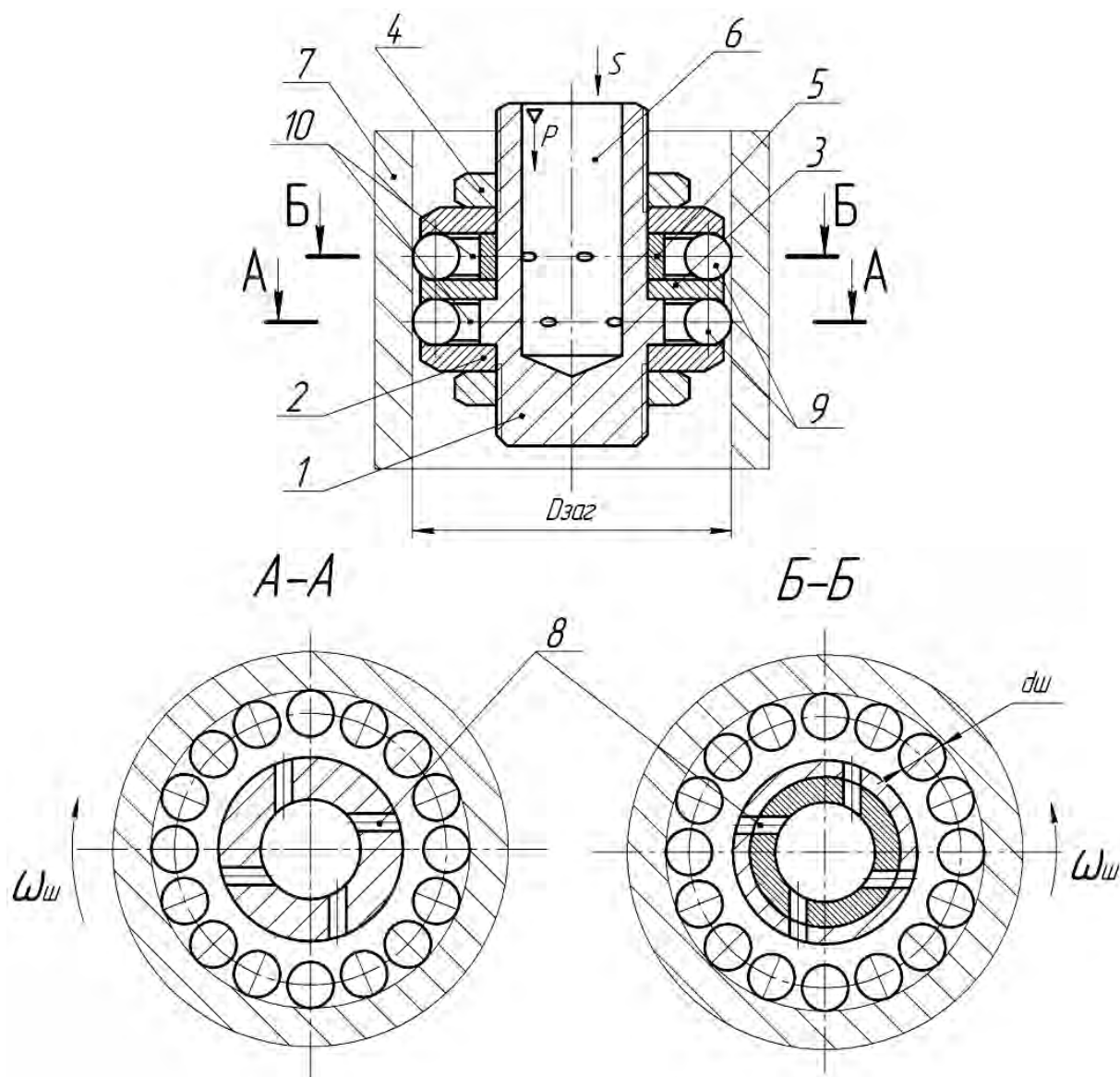
того, виброобкатывание рабочей поверхности гильз, осуществляемое после хонингования, производят шарами с образованием частично регулярного (смешанного) микрорельефа, который в сочетании с образующимися по краям синусоидальных канавок наплывами металла приводит к дымлению двигателя, т. е. повышенному угару масла [205]. Только после ввода дополнительной операции по снятию наплывов относительный расход масла на угар составляет 0,4...0,5 %. Это увеличивает трудоемкость в сравнении с традиционно применяемой технологией.

Анализ нетрадиционных методов повышения износостойкости пары трения гильза – поршневое кольцо (применение приработочных покрытий на поверхностях трения и присадок к маслу на этапе обкатки двигателя) показал, что повышение долговечности пары трения и КПД двигателей внутреннего сгорания может быть достигнуто, когда создаются условия для самоорганизации системы [205]. То есть в процессе приработки стремятся получить оптимальный (равновесный) микропрофиль рабочей поверхности гильзы аналогичный эксплуатационному. Установлено, что поверхность зеркала гильзы после специальной приработки имеет шероховатость $Ra = 0,32...0,16$ мкм. Впадины, полученные на операции хонингования, после упомянутой приработки исчезают, однако угар масла уменьшается, КПД ДВС и его ресурс работы возрастают. Помимо этого, эксплуатационная шероховатость рабочей поверхности гильз цилиндров блока двигателя после применения нетрадиционных методов находится в пределах $Ra = 0,031$ мкм. Однако достижение такого результата увеличивает себестоимость изготовления ДВС.

Таким образом, создание, разработка и исследование новых способов финишной обработки гильз ДВС, с помощью которых решается проблема ресурсо- и энергосбережения, приобретают особую актуальность.

Способ обработки внутренних поверхностей заготовок гильз ДВС, заключающийся в применении после лучистового хонингования ($Ra = 1,15...2,35$ мкм) процесса финишной упрочняющей пневмоцентрической обработки, не имеет описанных недостатков. В результате прогнозируется увеличение масляной экономичности двигателя, уменьшение расхода топлива и времени его обкатки, исключение дорогостоящей операции фосфатирования, прижогов, схватывания, повышение износостойкости, а также уменьшение энергопотребления при ПЦО. Качество поверхности после ПЦО в значительной степени соответствует правилу положительного градиента [202] и четвертому энергетическому уровню изнашивания.

В процессе упрочняющей ПЦО [14, 17] рабочая поверхность гильз ДВС подвергается тонкому динамическому наклепу (упрочнению) стальными шарами 9, расположенными в два ряда в инструменте, конструктивная схема которого приведена на рисунке 8.3.



1 – корпус; 2, 3 – диски; 4 – гайки; 5 – втулка; 6 – осевой канал; 7 – заготовка; 8 – тангенциальные сопла; 9 – шары; 10 – камера расширения

Рисунок 8.3 – Схема упрочняющей ПЦО гильз ДВС и инструмент для нее

Инструмент устанавливается соосно с неподвижной заготовкой 7 в вертикальном положении и во время обработки осуществляет перемещение вдоль ее оси. Сжатый воздух от системы питания подводится к

центральному осевому отверстию 6 инструмента и, проходя сквозь тангенциально расположенные сопла 8, приводит во вращение деформирующие шары 9, свободно размещенные в камере расширения 10.

Пластическое деформирование обрабатываемой поверхности происходит под действием центробежной силы, развиваемой шарами. Однако движение шаров в инструменте происходит по сложной траектории: имея шесть степеней свободы, шары совершают осциллирующее и радиальное перемещения по отношению к обрабатываемой поверхности гильзы в пределах осевого и радиального зазоров в камере расширения, а также вращаются вокруг собственной оси [207].

Сущность процесса упрочняющей ПЦО состоит в разнонаправленном силовом вибрационном воздействии шаров на исходный микрорельеф, способствующем снижению исходной шероховатости обрабатываемой поверхности. При этом смятие и сглаживание микровыступов происходит в различных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров при постоянном изменении направления вращения.

В процессе упрочняющей ПЦО происходит очищение обрабатываемой поверхности от графитной пыли, продуктов износа и абразива струями сжатого воздуха, что влияет на уменьшение коэффициента трения; следовательно, увеличивается износостойкость поверхности.

Локальное кратковременное воздействие деформирующих шаров в режиме автоколебательного движения на микронеровности в различных направлениях, согласно дислокационной теории, способствует увеличению количества плоскостей скольжения в блоках в различных направлениях и уменьшению сопротивления развитию очагов деформации. В результате этого поверхность получается не разрыхленной, как после хонингования, а цельной. Микротрещины, полученные на предшествующих операциях (хонингование), будут закрываться. Устраняются концентраторы напряжений [14, 204].

Находясь в кольцевом вихревом потоке сжатого воздуха, шары осуществляют виброколебания, оставляя на рабочей поверхности гильзы следы в виде отдельных лунок, расположенных хаотично, что подтверждается исследованиями, проведенными на растровом электронном микроскопе [17]. Автоколебательные движения деформирующих шаров, создающие амплитуду и частоту вибраций обрабатываемой заготовки, приспособления, инструмента, влияют на формирование характеристик микропрофиля рабочей поверхности детали.

Известно, что вибрация представляет собой гармонический процесс с постоянной амплитудой и частотой. Однако в процессе ПЦО автоколебания имеют переменную амплитуду, величина которой в данный момент случайна. Поэтому шероховатость поверхности, обработанной в условиях вибрации, можно рассматривать как совокупность неровностей со случайной амплитудой.

Кинематика движения рабочих элементов описывается уравнениями с учетом принятых допущений [14, 49, 189, 204].

Воздействие сил на исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности в разных направлениях и сложная кинематика движения шаров способствуют интенсификации процесса обработки и уменьшают силу воздействия шара на обрабатываемую поверхность для упрочняющей ПЦО ($F_{\max} \approx 30$ Н, при $D_{\text{отв}} = 110$ мм, $d_{\text{ш}} = 11,112$ мм) при давлении сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P_1 > 0,25$ МПа.

Электроэнергия требуется лишь для осевого перемещения инструмента, её расход в разы меньше, чем для хонингованных станков. Наличие в процессе ПЦО весьма малых сил деформации создает условия для образования тонкодеформированного слоя металла до 0,06 мм, обеспечивающего условия, близкие к равноизносности пары трения гильза – поршневое кольцо, способствует старению заготовки.

Заготовки в процессе обработки не нагреваются и не требуют применения СОЖ. Инструмент прост, обладает неоспоримыми преимуществами в сравнении с хонами.

Были выполнены поисковые исследования обработки гильз блока цилиндров мод. Д-245 упрочняющей ПЦО без плосковершинного хонингования. Материал гильзы – специальный серый чугун. Твердость – 229...269 НВ.

Макрогеометрия. Цилиндричность рабочей поверхности гильзы с номинальным диаметром 110 мм допускается не более 0,01 мм. Размер гильзы по высоте – 245 мм. Толщина стенки гильзы – 7,25 мм.

Микрогеометрия. Рабочая поверхность гильзы должна представлять собой сетку впадин глубиной 1,5...5 мкм, шириной 10...70 мкм, с площадками между ними с глубиной микронеровностей 0,1...1 мкм и шероховатостью поверхности гильзы 0,63...0,25 мкм. Базовая относительная опорная длина профиля должна составлять 60...85 %. Маслосъемкость рабочей поверхности должна быть 0,008...0,041 мм³/см². Впадины, образующие хонинговальную сетку, должны быть перекрещивающимися и наклонены к оси рабочей поверхности под углом 50...65°.

Технологическое оснащение процесса упрочняющей ПЦО: радиально-сверлильный станок мод. 2А55, двухрядный пневматический шариковый накатник центробежного действия, оригинальное приспособление для базирования гильзы по центрирующему пояску диаметром $126f7_{-0,083}^{-0,043}$ мм и по нижнему торцу ее буртика диаметром $133d11_{-0,395}^{-0,145}$ мм, устройство для установки в шпиндель станка, позволяющее соединять пневмосистему с инструментом и исключать его вращение.

Инструмент – пневмоцентробежный накатник с двумя рядами деформирующих шаров. В качестве заготовок использовались гильзы после операции полустого хонингования с шероховатостью поверхности $Ra = 1,12...2,34$ мкм.

Режимы процесса упрочняющей ПЦО гильз, определенные в результате поисковых исследований: давление сжатого воздуха в пневмосистеме $P_1 = 0,25...0,35$ МПа, минутная подача $S_{\text{мин}} = 100...150$ мм/мин, количество ходов инструмента $i = 1$. Таким образом, производительность процесса упрочняющей ПЦО соизмерима с производительностью плосковершинного хонингования.

Измерение шероховатости поверхности проводилось на профилометре-профилографе мод. 252 завода «Калибр», а также на профилометре-профилографе RTHALYSURF 5M фирмы «Тайлор Хобсон» (Taylor Hobson). На рисунке 8.4 дан общий вид измерительного комплекса, состоящего из профилометра, вычислительного блока, монитора и цветного печатающего устройства.

Замеры шероховатости и других информативных параметров поверхности проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.303-78 и стандарта DIN 4776 (Германия) [149], а также с разрешающей возможностью приборов.

Профилографирование рабочих поверхностей гильз, прошедших испытания, производили на участке от 40 до 35 мм от верхнего торца гильзы. При этом зона верхней мертвой точки (ВМТ) маслосъемного кольца находится на участке от 44 до 39 мм от верхнего торца гильзы, а зона ВМТ второго компрессионного кольца (минутного) – на участке от 34,5 до 32 мм.

На рисунке 8.5 представлена профилограмма рабочей поверхности гильзы, записанная на профилометре-профилографе RTHALYSURF 5M. Вертикальное увеличение – 5000, горизонтальное – 500.



Рисунок 8.4 – Общий вид измерительного комплекса фирмы «Тайлор Хобсон» (Taylor Hobson)

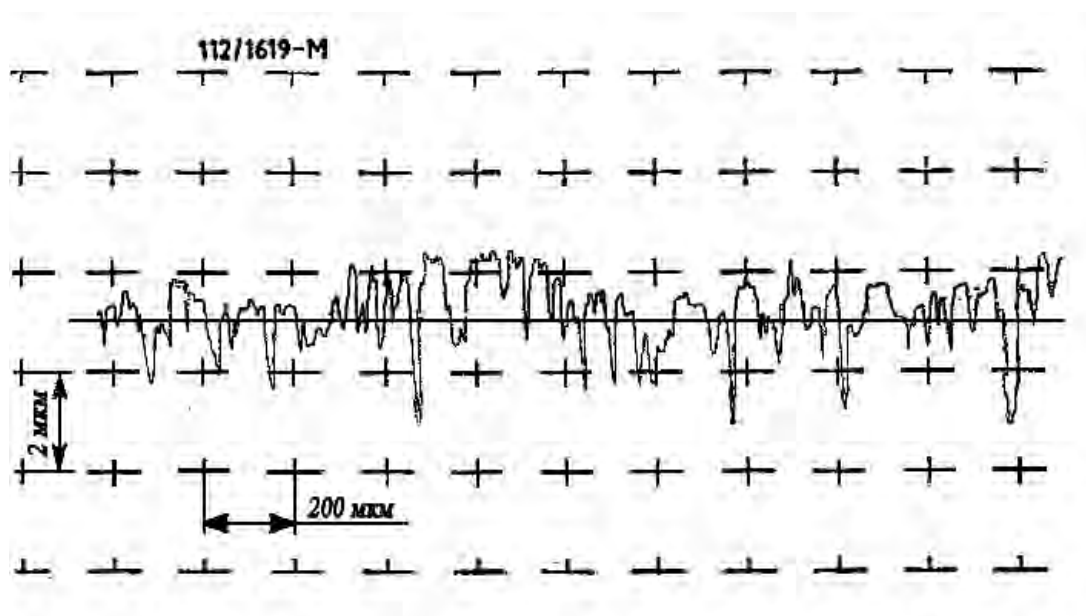


Рисунок 8.5 – Профилограмма рабочей поверхности гильзы цилиндра Д-245 после упрочняющей ПЦО

После ПЦО диаметральный размер рабочей поверхности гильзы увеличивался на 25...28 мкм. Отклонения от круглости и профиля продольного сечения рабочей поверхности гильзы оставались неизменными – 0,01 мм. Среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии $Ra = 0,47...0,558$ мкм, относительная опорная длина профиля $t_{50} = 85$ %.

Определение маслостойкости осуществлялось с использованием графических построений на кривой Аббота (рисунок 8.6) согласно стандарту DIN 4776. Исходный контур микрорельефа для расчета параметров получен после применения специального метода фильтрации поверхностного профиля [149].

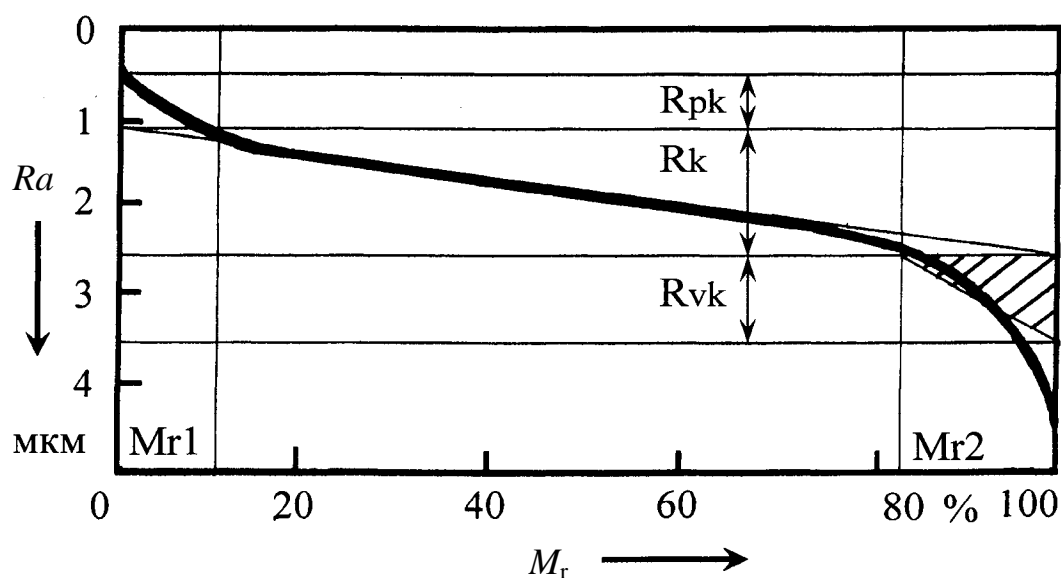


Рисунок 8.6 – Кривая Аббота для гильзы, рабочая поверхность которой обработана упрочняющей ПЦО

Глубина микрорельефа подразделяется на три области: центральная область профиля, область выступов и область впадин. Эти области описываются следующими параметрами [197]:

- средняя высота центральной области профиля шероховатости, длительное время находящаяся в работе и являющаяся несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев ($R_k = 1,4$ мкм), влияющая на эксплуатационные свойства и определяющая срок службы поверхностей трения;

- средняя высота выступов профиля ($R_{pk} = 0,6$ мкм), характеризующая высоту выступов, быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации, значительно влияющая на время приработки поверхностей

трения. Для сокращения времени первого периода необходимо стремиться к снижению параметра R_{pk} ;

- средняя глубина впадин профиля ($R_{vk} = 1,0$ мкм), характеризующая маслосъемкость поверхностей трения; с увеличением параметра R_{vk} возрастает маслосъемкость и уменьшается коэффициент трения;

- опорные коэффициенты M_{r1} и M_{r2} ; $M_{r1} = 11$ % – определяется для линии разреза, которая отделяет выступы от основного микрорельефа, $M_{r2} = 84$ % – определяется для линии разреза, которая отделяет впадины от основного микрорельефа.

Согласно полученным данным, расчет удельной маслосъемкости Q поверхности производится по формуле [150]

$$Q = \frac{R_{vk}}{20} \left(1 - \frac{M_{r2}}{100 \%} \right). \quad (8.2)$$

Значения маслосъемкости, рассчитанные для гильз, составили после плосковершинного хонингования (ПВХ) $Q = 0,269$ мм³/см², после упрочняющей ПЦО $Q = 0,0092$ мм³/см².

Стендовые испытания проводились в соответствии с ГОСТ 18509-88 по 60-часовой программе [199]. В таблице 8.2 приведены результаты испытаний дизеля Д-245 с гильзами, рабочая поверхность которых прошла упрочняющую ПЦО. Дизель Д-245 комплектовался гильзами из отливок Костромского завода «Мотордеталь», поршнями 260-1004021-В производства ОАО «Минский моторный завод», поршневыми кольцами 245-1004060-Б производства «Бузулук», угол опережения впрыска топлива установлен равным 20° поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (п. к. в. до ВМТ).

Представленные к испытаниям опытные гильзы цилиндров 245-1002021-А, упрочненные ПЦО для получения зеркала цилиндра, равноценны по влиянию на удельный расход топлива и улучшают относительный расход картерного масла на угар на 0,09...0,1 % по сравнению с гильзами штатной комплектации дизеля Д-245.

Однако достигнутые результаты по относительному расходу масла на угар не являются предельными.

Внешний осмотр поршней, поршневых колец и гильз цилиндров, прошедших ПЦО, после 60-часовых испытаний дефектов не выявил. Все детали цилиндропоршневой группы пригодны к дальнейшей работе.

Таблица 8.2 – Результаты стендовых 60-часовых испытаний цилиндров дизеля Д-245, комплектовавшихся гильзами цилиндров с различной финишной обработкой поверхности

Параметры	Дизель Д-245 (ТУ 23.1.365-84)	Гильза, прошедшая ПВХ	Гильза, прошедшая ПЦО
Расход масла на угар, %	0,5, не более	0,31*...0,34*	0,22*...0,24*
Расход картерных газов $Q_{г}$, л/мин	–	44*...47*	45*...47*
Давление картерных газов $P_{к.г.}$, мм вод. ст.	40, не более	16*	15*
Частота вращения коленчатого вала n , мин ⁻¹	2200 ⁺⁴⁰ ₋₂₅	2200	2200
Эффективная мощность N_e , кВт	77 ⁺⁴	77	77
Удельный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	220 + 3 %, не более	224	224
Условное среднее давление механических потерь $P_{м.п.}$, МПа	0,25, не более	0,20	0,20
Давление масла P_m , МПа	0,34, не более	–	–
<i>Примечание – * – показатели замерены на угарном режиме при $N_e = 0,9N_{e0}$</i>			

На поверхности гильзы, полученной ПВХ, четко были видны темные полосы – натир и продольные царапины. Кроме того, в отраженном свете хорошо просматривалось наличие зоны повышенного износа на рабочей поверхности гильзы, полученной ПВХ, в то время как на рабочей поверхности гильзы, полученной ПЦО, нет зон повышенного износа и продольных царапин, натиров. Это свидетельствует о том, что упрочняющая ПЦО на финишном этапе обработки рабочих поверхностей гильз предпочтительнее ПВХ.

От использования предлагаемой технологии упрочняющей ПЦО рабочей поверхности гильзы ожидается увеличение износостойкости гильз в 1,5...2 раза за счет снижения коэффициента трения в паре до величины $k \leq 0,1$ [35, 36, 209–211].

8.4 Совершенствование технологии изготовления гильз двигателей

Хорошо зарекомендовал себя в производстве процесс ПВХ, обладающий как положительными, так и отрицательными свойствами. По ряду причин он является сдерживающим фактором для развития технологии финишной обработки зеркала гильз [46]. ПВХ имеет такие недостатки, как нестабильность получаемого микрорельефа рабочей поверхности гильзы, многостадийность и трудоемкость обработки алмазными и безалмазными брусками. По данным зарубежных фирм, длительная работа брусков в хонголовках из сверхтвердых материалов (СТМ) приводит к засаливанию, а затем наклепу материала гильзы и, как следствие, раздавливанию зерен графита. В результате на рабочей поверхности гильзы образуется так называемый «металлический кожух». Прижоги, схватывание гильзы в процессе работы с поршнем в таком случае неизбежны [170]. Установлены факторы, влияющие на образование прижогов (рисунок 8.7).



Рисунок 8.7 – Структурные составляющие факторов, влияющих на образование прижогов

Производство с применением для обработки гильз цилиндров хонинговальных станков и СОЖ, в состав которой входит керосин и масло, является вредным для человека.

Упрочняющая ПЦО гильз цилиндров исключает этот недостаток. Более того, обработку можно осуществлять на станках-полуавтоматах, автоматизированных машинах и роторных линиях. Это экологически чистое производство. Такой способ позволяет управлять микрорельефом обрабатываемой поверхности с помощью как конструктивных, так и технологических параметров. Следует отметить, что в процессе ПВДО рабочей поверхности образуется тонкодеформированный слой (0,015...0,1 мм). Это важно для создания благоприятных условий работы пар сухого и полусухого трения (цилиндропоршневая группа ДВС) [171].

Основную часть гильз цилиндров автомобильных, тракторных и комбайновых ДВС изготавливают из специальных легированных чугунов, заготовки которых по зеркалу цилиндра подвергают закалке ТВЧ на глубину 1...2 мм ($HRC \geq 40$). Отмечено, что необходимость закалки гильз связана с плохим качеством воздушных фильтров ДВС. Это не позволяет повысить моторесурс гильз до уровня зарубежных аналогов.

Вместе с тем доказано, что закаленная гильза создает релаксацию напряжений, происходит ее коробление, ухудшается макрогеометрия в отличие от незакаленной. Это приводит к интенсивному износу в ДВС. О значении борьбы с изнашиванием машин можно судить по данным работы [172]. По оценке специалистов США, регулирование процесса изнашивания позволит решить такие задачи, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, обеспечение надежности и безопасности механических систем. Внедрение в практику результатов триботехники, возможно, даст экономический эффект 12...16 млрд долл. [172].

В [31–36] отмечено, что процесс самоорганизации эксплуатационного микрорельефа пар трения протекает более благоприятно, если используются незакаленные гильзы. Существенно снижается их износ. Этому способствует процесс избирательного переноса, возникающий в паре трения, одна из деталей которой (гильза) подвергнута, например, латунированию по способу ФАБО (финишная антифрикционная безабразивная обработка).

Наряду с этим, механическое латунирование по лицензии Инженерной высшей школы «Звикау» (Ingenieurhochschule Zwickau, Германия) заключается в том, что значительным усилием нажатия слой латуни толщиной 2...4 мкм наносится на рабочую поверхность трения. Особенностью способа является то, что такие слои до определенной

степени обладают способностью саморегенерации. Это обеспечивает длительный период эксплуатации изделия.

Эффект фрикционного латунирования заключается в снижении износа до 40 % в парах трения, работающих в масляной среде, выполненных из стали и чугуна, большей производительности изделий в результате более высокого КПД, устранении склонности к схватыванию, уменьшении периода приработки пары трения, экономии энергии вследствие уменьшения трения.

Латунирование успешно применяют в парах трения, т. к. оно может заменять дорогостоящие и менее безвредные для окружающей среды способы нанесения покрытий, предназначенных для уменьшения трения и износа (фосфотирование, азотирование, гальваническое нанесение покрытия из меди и др.).

Благодаря фрикционному латунированию обеспечивается низкий уровень окисления в зонах трения контактных поверхностей. На рисунке 8.8 показано радиальное распределение истирания стенки цилиндров двухтактного двигателя машины, прошедшей расстояние 100000 км. Экономия горючего подтверждена Ведомством по стандартизации и метрологии Германии.

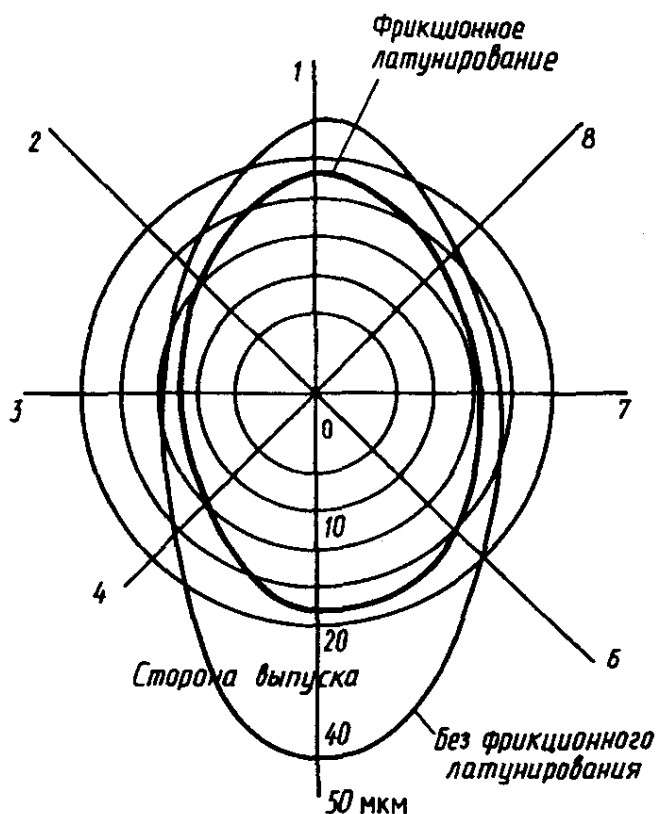


Рисунок 8.8 – Радиальное распределение истирания стенки цилиндра ДВС

За рубежом выполнены разработки, подтверждающие влияние многих факторов на показатели долговечности и надежности работы ДВС, среди которых толщина масляной пленки в паре трения является определяющей.

Фактором, который влияет на образование оптимальной толщины масляной пленки, является технологическая наследственность. Это первое звено. Так, например, метод получения заготовки будет существенно влиять на конструктивные и технологические характеристики пары трения гильза – поршень – кольцо [173–175].

Таким образом, научные и практические исследования в области финишной обработки гильз цилиндров и приравненных к ним деталей исходя из условий их эксплуатации и с учетом современного развития триботехники позволяет сделать следующие выводы:

1) актуальным направлением следует считать создание модифицированных серых чугунов для заготовок гильз;

2) заготовки гильз необходимо получать специальными способами литья, например центробежными, которые улучшают механические свойства материала, более благоприятное распределение графита в поверхностном слое у зеркала цилиндра и расположение шлаков, включений и других дефектов на внутренней поверхности заготовки; материал при этом получают с гораздо меньшим числом раковин, литейных дефектов в отличие от литья в песчано-глинистые формы;

3) среди существующих способов механической обработки гильз цилиндров и их зеркал наиболее совершенным считается плосковершинное хонингование для новых, неизношенных брусков из сверхтвердых материалов (СТМ); однако при их длительной эксплуатации происходит засаливание режущей части, сопровождающееся интенсивным наклепом обрабатываемой поверхности, разрушением графитных зерен, что отрицательно сказывается на работоспособности гильзы;

4) целесообразно создавать оборудование для тонкого растачивания гильз цилиндров;

5) финишным способом обработки может быть любой технологический процесс, обеспечивающий получение в гильзе тонкодеформированного слоя и оптимальной маслосъемности поверхности;

6) используя опыт ученых России и Германии, необходимо применять различные способы покрытий поверхности зеркала цилиндра, например латунирование, для реализации эффекта избирательного переноса;

7) нежелательно использовать закалку поверхностного слоя зеркала цилиндра, т. к. это противоречит основным законам триботехники для пар сухого и полусухого трения.

8.5 Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров

Проблема финишной обработки гильз состоит в том, что при использовании широко распространенного жесткого роликового накатника значительная часть деталей получается с отклонениями от технических требований чертежа по макро- и микрогеометрии. Это происходит потому, что в процессе обработки производятся поверхностное пластическое деформирование (ППД) микрогребешков заготовки и ее объемное деформирование [159].

Данная проблема относится к финишной обработке внутренней поверхности гильз центрального опрокидывающего механизма (ЦОМ) машин, где оговорены жесткие требования к допуску цилиндричности по всей длине детали в зависимости от степени точности [27], отклонение от которых приводит к снижению качества изготовления гильз. Кроме того, необходимо контролировать соблюдение и других параметров по макрогеометрии и шероховатости обрабатываемой поверхности гильз. В соответствии с техническими требованиями чертежа шероховатость рабочей поверхности гильз должна находиться в пределах $Ra = 0,16 \dots 0,63$ мкм.

После обработки внутренних цилиндрических поверхностей тонкостенных заготовок гильз ЦОМ получают более грубую шероховатость поверхности, т. к. для исключения объемного деформирования заготовок и снижения риска некачественного изготовления используют меньшие значения натяга, чем при раскатывании жестких заготовок.

Качество изготовления гильзы и уплотнительных элементов определяет надежность гидропривода по числу отказов. Известно, что 44 % отказов в период эксплуатации машин и механизмов связаны с износом уплотнений [28].

Критерий отказа – переход в неработоспособное состояние, требующее остановки работы гидроцилиндра для устранения неисправности. Неработоспособность – это состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации.

Критерием предельного состояния гидроцилиндров, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, является

уменьшение общего КПД и (или) увеличение удельного объема выносимой рабочей жидкости более чем в 1,2 раза от установленного значения для гидроцилиндров конкретного типа, не устраняемое заменой уплотнителей и опорных колец.

Эффективная работа гидроцилиндра возможна только при условии его полной герметичности, однако такой узел надо рассматривать как систему, долговечность которой зависит от всех элементов, входящих в ее состав.

Основными причинами отказов силовых гидроцилиндров являются:

- вынос масла по штоку, связанный с нарушением уплотнений штока;
- внутренние перетечки рабочей жидкости, причина которых – износ резиновых уплотнений поршня;
- деформация и износ корпуса цилиндра, поверхностей гильзы, поршня, штока.

При этом самое большое число отказов связано с износом уплотнений, несколько меньшее – с изогнутостью штока. Все остальные отказы составляют лишь около 5...7 % [28, 29].

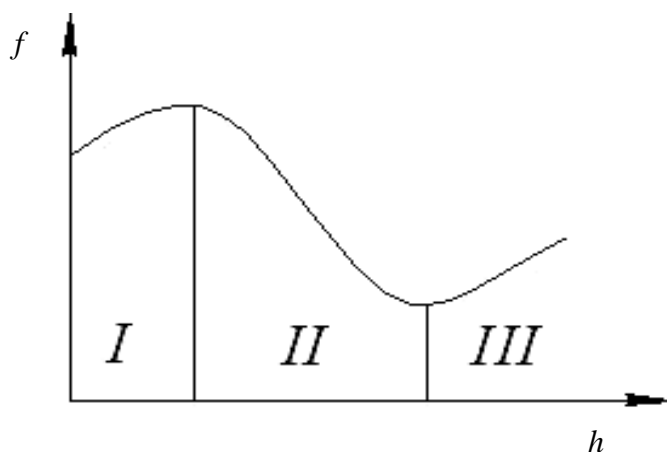
В процессе работы гидроцилиндра наибольший износ уплотнений происходит в подвижных соединениях, таких как поршневое кольцо – гильза гидроцилиндра и штоковое уплотнение – шток.

Гильзы гидроцилиндров изготавливают в основном из бесшовных горячекатаных труб (ГОСТ 8732-78), а также из холоднотянутых и холоднокатаных (ГОСТ 8734-75). Материалом труб чаще всего служат стали 20, 35 и 45 (ГОСТ 1050-88) [47, 49].

Для уплотнения поршня применяют главным образом резиновые круглые кольца (ГОСТ 9833-73), которые благодаря своей эластичности легко приспособляются к мельчайшим неровностям металлической поверхности и обеспечивают герметичность соединения. В процессе эксплуатации под влиянием рабочей жидкости, температуры и прилагаемой нагрузки упругие свойства уплотнений со временем ухудшаются, происходит изнашивание, которое в зависимости от физико-механических свойств резины может быть трех видов: усталостное, абразивное и изнашивание при заедании [30].

Механизм трения определяется наличием или отсутствием пленки смазочного материала между контактирующими поверхностями. На рисунке 8.9 приведена зависимость коэффициента трения f от относительной толщины смазывающей пленки h , которая характеризуется отношением толщины пленки δ между контртелами к параметру

шероховатости поверхности R_z [28]. Поскольку уплотнения поршня являются контактными, пленка между элементами пары трения может отсутствовать или ее толщина будет очень мала. Поэтому на износ контактирующих элементов значительное влияние будет оказывать шероховатость сопряженной поверхности гильзы. Если стремиться к снижению параметра R_z , то увеличивается относительная толщина смазывающей пленки h (обратная зависимость, см. рисунок 8.9) и, соответственно, режим трения перейдет в трение со смазкой, а коэффициент трения уменьшится. Таким образом, на подвижные элементы в металлополимерной паре действуют силы сухого трения и благодаря тонкому смазывающему слою, созданному вязкой рабочей жидкостью, трение может быть смешанным и граничным [78].



I – трение без смазки; II и III – трение со смазкой

Рисунок 8.9 – Зависимость коэффициента трения от относительной толщины смазывающей пленки

Для уплотнений поршня установлены требования к надежности. Так, полный установленный ресурс при номинальных значениях давления и скорости движения поршня для резиновых уплотнений должен быть не менее 300 км пути, а для комбинированных (наполненный полиамид или фторопласт, термопластичный полиуретан) – не менее 700 км (ГОСТ 14896-84, ГОСТ 18829-73).

Согласно ГОСТ 30408-96, подвижные уплотнения должны обеспечивать герметичность в течение 4000 ч.

Уплотнительное кольцо поршня образует пару трения с гильзой гидроцилиндра и в процессе установки сжимается с некоторой силой для перекрытия впадин микрорельефа гильзы, по которым просачивается

масло. Работа пары трения характеризуется тремя стадиями нагружения уплотнителя [154]. В начальный период работы в поверхностном слое уплотнителя за счет сил деформации создаются напряжения, способствующие заполнению микронеровностей, возникает начальная поверхность контакта сопрягаемых поверхностей, которая не имеет утечек. На второй стадии площадь контакта постепенно уменьшается, происходит износ уплотнительного элемента. Третья стадия характеризуется наибольшим износом уплотнителя, за счет чего рабочая жидкость проникает в полости микрорельефа гильзы и приводит к полному разъединению поверхностей трения, а следовательно, к полному расходованию ресурса.

Таким образом, ресурс уплотнительного элемента зависит от рабочего давления, размеров площадки контакта поверхностей трения, величины шероховатости и особенностей микрорельефа гильзы, а также физических свойств сопрягаемых материалов.

Для увеличения износостойкости материалов пары трения необходимо соблюдать правило положительного градиента механических свойств и стремиться к минимальному внедрению контактируемого тела в сопряженную поверхность. Наличие положительного градиента механических свойств обеспечивается изготовлением уплотнений с заданной точностью и шероховатостью поверхности, а также применением материалов, позволяющих снизить коэффициент трения. Минимальное внедрение поверхностей можно получить за счет гладкости твердой металлической поверхности гильзы путем снижения ее шероховатости.

Установлено, что решающее влияние на трение и износ резины (уплотнения) оказывает шероховатость рабочей поверхности гильзы [154].

С точки зрения современной науки о трении и износе [155, 156] в паре трения сталь – полимер (гильза гидроцилиндра – уплотнительное кольцо) при шероховатости стальной поверхности $Ra \geq 0,1$ мкм полимер начинает интенсивно изнашиваться. Однако не все предприятия могут обеспечить такое качество в сравнении с зарубежными аналогами по уровню утечек, сроку службы и другим параметрам.

Таким образом, проблема повышения долговечности и ресурса пары трения гильза гидроцилиндра – уплотнитель приобретает актуальный характер, и только научный подход позволит ее решить.

Эксплуатационные характеристики обработанной рабочей поверхности гильзы гидроцилиндра зависят от качества поверхностного слоя, полученного в процессе механической обработки.

Поверхностный слой – это слой на поверхности детали, который отличается от основного материала своей структурой, фазовым и хими-

ческим составом. Данный слой в процессе работы детали воспринимает все нагрузки и внешние факторы воздействия. Эти специфические характеристики поверхностный слой приобретает в процессе обработки заготовки, а в большей степени на его формирование оказывают влияние определенная последовательность и сочетание операций обработки, технологическая наследственность [158, 163].

Поверхностный слой обладает искаженной кристаллической структурой по сравнению с основным металлом и условно может быть разделен на зоны, толщина которых может изменяться в зависимости от состава металла, условий обработки и эксплуатации.

Исследования в области трибологии и инженерии поверхности показали, что выделить единственный параметр, который определяет качество поверхности, невозможно. Для оценки состояния поверхностного слоя используют большое количество единичных и комплексных показателей, на основании которых можно оценить качество поверхности детали, а в последствии сделать вывод о ее эксплуатационных свойствах.

Пара трения гильза – поршневое уплотнение должна обеспечивать в первую очередь герметичность соединения, а также обладать повышенной износостойкостью для обеспечения длительной работы гидроцилиндра. Характер износа в паре трения носит усталостный характер, т. е. усталостные разрушения элементов пары трения (особенно уплотнителя) происходят в результате приложения цикловых нагрузок. Таким образом, основные факторы, влияющие на эксплуатационные свойства деталей данной пары трения, – это сопротивление усталости, износостойкость и герметичность соединения.

Герметичность соединений зависит от геометрии уплотнения, физико-механических свойств материала, а также от параметров микро- и макрогеометрии, степени упрочнения.

Существует ряд современных физических методов, с помощью которых исследуются свойства поверхностей и оценивается качество их обработки, но этих методов недостаточно для полного представления об особенностях взаимодействия на поверхностях. Для управления свойствами поверхностей необходимо знать о поведении физических и химических параметров, характеризующих твёрдое тело, например таких как работа выхода электронов (РВЭ) [202].

Известно, что на процессы, происходящие при взаимодействии пары трения гильза – уплотнитель, влияет состояние поверхности отверстия стальной гильзы с позиции энергетической характеристики поверхностного слоя. Поверхностный слой твердого тела обладает избытком

энергии, т. к. молекулы и атомы, находящиеся на поверхности, имеют свободные связи, способствующие возникновению таких явлений, как поглощение (адсорбция), сцепление (когезия), прилипание (адгезия), смачивание и другие виды взаимодействия. Избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называется поверхностной энергией [16].

Основным параметром, характеризующим энергетическое состояние поверхности, в теории металлов и полупроводников является РВЭ [202]. Изменение РВЭ позволяет оценить многие процессы, происходящие на поверхности твёрдых тел и межфазных поверхностных слоях. РВЭ зависит от состояния поверхности и является величиной, чувствительной к структурным изменениям и, соответственно, к качеству и способу обработки поверхности, наличию оксидов, адсорбционных слоёв газов, молекул смазки и так далее. Чем выше РВЭ в поверхностном слое изделия, тем более благоприятно это сказывается на его эксплуатационных характеристиках; чем ниже РВЭ, тем интенсивнее протекает процесс износа поверхности.

Для измерения РВЭ применяется метод контактной разности потенциалов (КРП), используемый при изучении трибофизических и трибохимических процессов. КРП – величина обратная РВЭ, т. е. наименьшему значению КРП соответствует наибольшее значение РВЭ.

В работе Г. П. Шпенькова [202] представлена зависимость КРП от шероховатости поверхности $U_K = f(Ra)$. Данная зависимость имеет строго определённый, общий для всех материалов вид (рисунок 8.10).

На графиках имеются два ярко выраженных максимума КРП (минимумов РВЭ). Один максимум приходится на $Ra = 0,32$ мкм, второй – на $Ra = 0,05$ мкм. При этом максимальной РВЭ обладают поверхности с $Ra \leq 0,025$ мкм, обладающие большей износостойкостью, но требующие больших трудозатрат на ее получение.

Характер зависимости КРП от качества обработанной поверхности объясняется положениями теории усталостного разрушения материалов [169], а также представлениями о влиянии на величину РВЭ количества, природы и динамики дефектов, содержащихся в поверхностном слое металла.

При механической обработке поверхностей под воздействием инструмента происходит процесс массового весьма тонкого микрорезания или деформирования. Это приводит к образованию сильно искажённого слоя – зона А (рисунок 8.11).

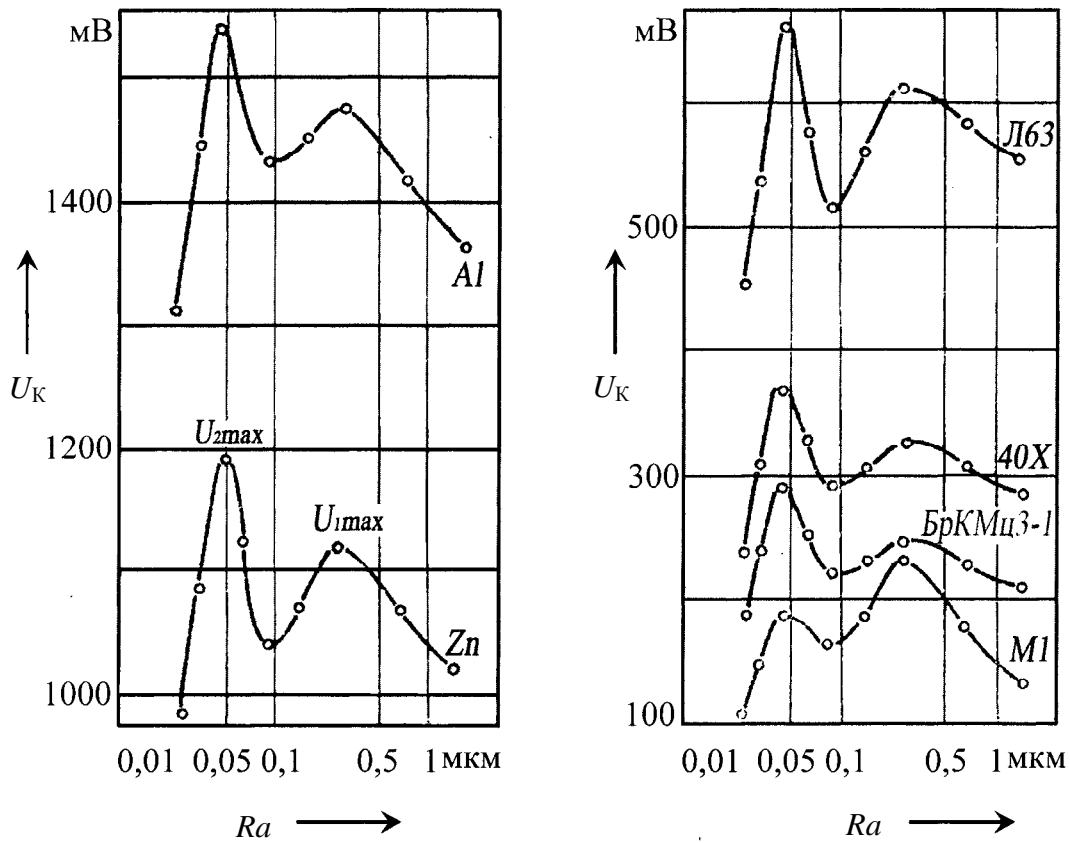
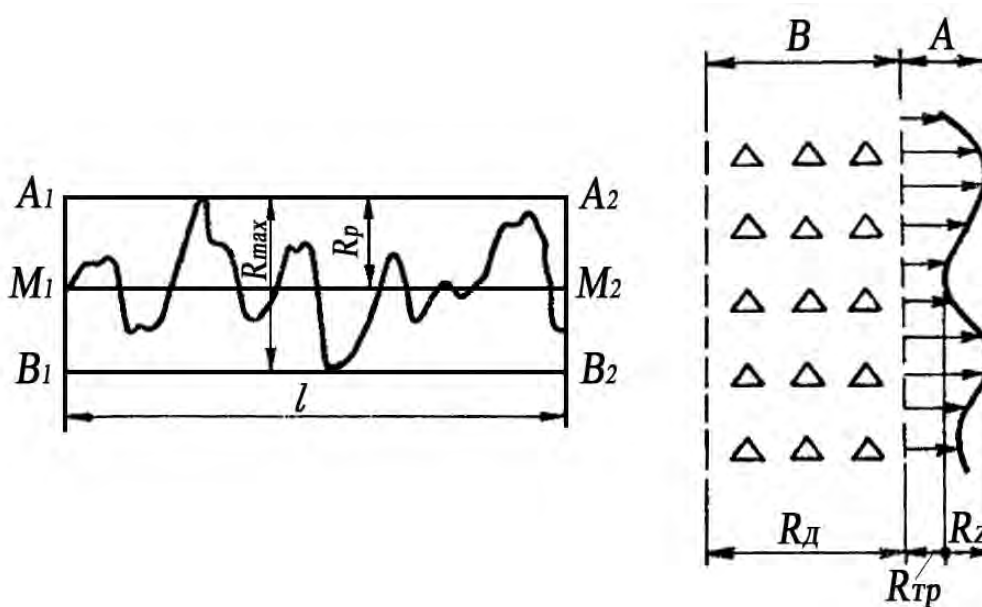


Рисунок 8.10 – Зависимость КРП алюминия *Al*, цинка *Zn*, меди *M1*, бронзы БрКМц3-1, стали 40Х и латуни Л63 от параметра шероховатости *Ra*



l – базовая длина; A_1 – A_2 и B_1 – B_2 – линии выступов и впадин профиля; R_p – наибольшая высота выступа; R_{max} – максимальная высота неровностей

Рисунок 8.11 – Параметры шероховатости поверхности

Зона *A* включает рельефный слой R_z и расположенный под ним насыщенный трещинами слой $R_{тр}$, под которым образуется зона *B* с большим остаточным напряжением (зона повышенной плотности дислокаций R_d). Максимальная величина напряжений находится на границе между зонами *A* и *B*, минимальная – на границе между зоной *B* и исходным ненарушенным металлом. Эти две зоны составляют механически нарушенный слой, при этом толщина зоны *A* составляет 0,1 от общей толщины нарушенного слоя.

Обработка металлов на финишных операциях абразивным инструментом или ППД приводит к различиям по толщине всего механически нарушенного слоя и высоте неровностей профиля поверхности, к изменению структуры поверхности, к различной глубине залегания границы зон *A* и *B*, которая характеризуется максимальными напряжениями и максимальной плотностью дислокаций, и, как следствие, к различной плотности дефектов на поверхности. Таким образом, физико-химические свойства обработанной поверхности, в том числе РВЭ (или КРП), в значительной степени зависят от перечисленных факторов, что и подтверждается зависимостью $U_K = f(Ra)$.

Рассматривая зависимость $U_K = f(Ra)$, начиная с грубой обработки поверхности ($Ra = 1,25...2,00$ мкм), наблюдают плавное повышение значения КРП. Это объясняется формированием поверхностного слоя, содержащего большое количество различного вида дефектов, являющихся активными центрами с пониженной РВЭ. Дальнейший рост КРП при уменьшении значения Ra до 0,32 мкм можно объяснить тем, что происходят большая разориентация и размельчение блоков зёрен металла и, как следствие, интенсивное образование дефектов и новых поверхностей [202].

Анализируя зависимость КРП от шероховатости поверхности $U_K = f(Ra)$ для стали 40Х и других материалов, можно сделать вывод, что при финишной обработке внутренней цилиндрической поверхности гильзы гидроцилиндров следует избегать получения значений шероховатости, которые соответствуют двум ярко выраженным максимумам КРП, т. к. РВЭ при этом имеет минимальное значение.

Предпочтительнее назначение шероховатости поверхности из оптимальной зоны КРП, что соответствует $Ra = 0,08...0,10$ мкм и уже подтверждено результатами суперфинишной пневмоцентробежной обработки (ПЦО) гильз гидроцилиндров [197].

Выполнение рекомендаций существенно повлияет на повышение эксплуатационных свойств поверхности, а в ряде случаев существенно снизит трудоемкость финишной обработки, повысив ее качество.

Рентгеновские и электронографические исследования полированных поверхностей показали, что тонкие поверхностные слои (слои Бейльби), толщина которых колеблется от 10^{-3} мкм до нескольких микрометров, состоят из большого числа беспорядочно расположенных и чрезвычайно мелких кристаллов [202], т. е. поверхность металла находится в высокодисперсном кристаллическом состоянии.

Измельченная ультрадисперсная (размер частиц 0,10...0,01 мкм) структура поверхности представляет собой высокопрочное соединение, а полирование способствует устранению дефектов, приводящему к увеличению объемной прочности на 2...3 порядка [202]. Это обусловлено минимальной плотностью дислокаций в тончайшем поверхностном слое с оптимальным микрорельефом.

Полученную зависимость U_K от параметров шероховатости Ra нельзя связывать только с различием параметров микрогеометрического профиля поверхности, влияние микрогеометрии должно рассматриваться в связи с физическим состоянием поверхности, возникшим при достижении данной шероховатости. Зависимость $U_K = f(Ra)$ является общей для разных материалов, отличающихся по микроструктуре, и свидетельствует о том, что существует единый механизм, управляющий движением и возникновением дислокаций, появлением и ростом трещин [202].

В [180] представлены технологические возможности достижения шероховатости внутренней цилиндрической поверхности стальной детали жестким роликовым накатником до $Ra = 0,04$ мкм (см. таблицу 1.3).

Обеспечение низкой шероховатости, необходимой для рабочей поверхности гильзы, связано с довольно жестким, как указано в таблице 1.3, полем допуска для натяга. В результате такой шероховатости возникает определенная кинетика КРП в тончайшем слое металла. Однако технологические возможности отечественного оборудования для финишной обработки гильз растачиванием с последующим ППД поверхности заготовки пока недостаточны для решения этой проблемы.

Повышение износостойкости рабочей поверхности гильзы может быть достигнуто в результате рационального сочетания последовательности выполняемых технологических операций (см. таблицу 1.4).

Анализируя данные таблицы 1.4 и данные [78], можно с достаточной долей вероятности утверждать, что оптимальной в настоящее время

технологией обработки внутренних поверхностей гильз гидроцилиндров является суперфинишная пневмоцентробежная обработка (ПЦО) [197].

Проведены поисковые исследования технологических возможностей способа ПЦО внутренней поверхности трубы выдвижной IV (для МАЗа) центрального опрокидывающего механизма автомобиля МАЗ (чертеж 55165-8603565) с исходными данными: материал заготовки – сталь 45 (ГОСТ 1050-89), твердость HV 156...217, термообработка – нормализация, наружный диаметр – 100 мм, диаметр отверстия – $87^{+0,14}$ мм, длина – 867 мм, допуск цилиндричности – 0,04 мм, шероховатость поверхности $Ra = 0,63$ мкм.

Следует отметить, что указанная в технической документации шероховатость поверхности $Ra = 0,63$ мкм в соответствии с рисунком 8.10 [202] является оптимальной для обеспечения уменьшения КРП, что приводит к увеличению РВЭ и износостойкости поверхности.

Финишная упрочняющая ПЦО опытной партии гильз производилась на токарно-винторезном станке мод. 1М63 в специальном приспособлении.

Исходная шероховатость под упрочняющую ПЦО $Ra = 2,5$ мкм. Инструмент – двухрядный накатник пневмоцентробежного действия, оснащенный стальными шарами. Режимы процесса обработки: давление сжатого воздуха, подводимого к инструменту, $P = 0,25$ МПа, частота вращения заготовки $n = 800$ мин⁻¹, подача инструмента $s = 240$ мм/мин, количество ходов инструмента $i = 1$.

В результате обработки опытной партии заготовок достигнуты параметры качества поверхности в соответствии с требованиями чертежа $Ra \leq 0,63$ мкм, цилиндричность меньше либо равна 0,04 мкм, внутренний диаметр гильзы $87^{+0,14}$ мм.

При исходной шероховатости поверхности под накатку $Ra = 2,5...0,5$ мкм (минутная подача $S_{\text{мин}} = 600$ мм/мин) достигается шероховатость поверхности $Ra = 0,14...0,16$ мкм.

В сравнении с жестким роликовым накатником, используемым большинством заводов СНГ, для изготовления нежестких заготовок гильз гидроцилиндров, в том числе и гильз ЦОМ машин, пневмонакатник центробежного действия обладает неоспоримыми преимуществами: не искажает геометрию, полученную на предшествующей ПЦО операции, не требует применения смазочно-охлаждающей жидкости, расходует в разы меньшее количество электроэнергии, заготовка при обработке не нагревается, стоимость инструмента существенно ниже, т. к. он прост в изготовлении. Центробежная сила, развиваемая шаром диаметром 10 мм при ПЦО, равна 30 Н, а крутящий момент – 1,5 Н·м.

Для исследования влияния суперфинишной ПЦО на эксплуатационные свойства внутренней цилиндрической поверхности образцов заготовок гильз гидроцилиндров был проведен сравнительный анализ профилограмм поверхностей в соответствии с методикой, изложенной в стандарте DIN 4776 [149].

На рисунке 8.12 приведены профилограммы рабочих поверхностей гильз гидроцилиндров, обработанных по трем технологиям. В одном случае (см. рисунок 8.12, *а*) обработка производилась по отечественной технологии и на завершающей операции включала раскатывание жестким роликом ($Ra = 0,11$ мкм); во втором (см. рисунок 8.12, *б*) – обработка по предложенному в таблице 1.4 способу, вариант 11, завершающей операцией которой стала суперфинишная ПЦО ($Ra = 0,08$ мкм); в третьем (см. рисунок 8.12, *в*) – обработка по итальянской технологии фирмы «Контарини» (Contarini), конечной операцией в которой было хонингование ($Ra = 0,02$ мкм).

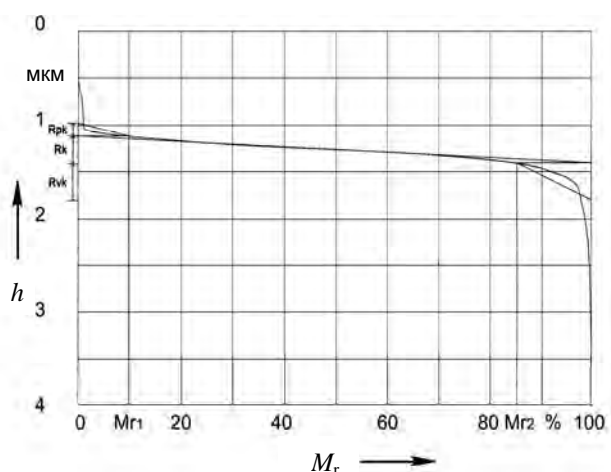
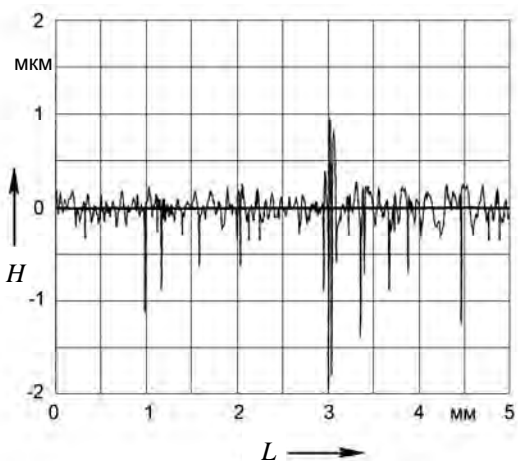
На рисунке 8.12, *а* $R_k = 0,303$ мкм, $R_{pk} = 0,137$ мкм, $R_{vk} = 0,401$ мкм, $M_{r1} = 9,87$ %, $M_{r2} = 85,48$ %. На рисунке 8.12, *б* $R_k = 0,246$ мкм, $R_{pk} = 0,046$ мкм, $R_{vk} = 0,366$ мкм, $M_{r1} = 5,74$ %, $M_{r2} = 89,18$ %. На рисунке 8.12, *в* $R_k = 0,073$ мкм, $R_{pk} = 0,024$ мкм, $R_{vk} = 0,071$ мкм, $M_{r1} = 8,56$ %, $M_{r2} = 87,47$ %.

Сравнительный анализ параметров R_{vk} , R_{pk} и R_k (таблица 8.3) показал преимущества поверхности после суперфинишной ПЦО с точки зрения прирабатываемости и несущей способности над поверхностью, обработанной жестким роликовым накатником. Помимо этого, имеется некоторое сходство по параметру R_{pk} с поверхностью, обработанной по технологии фирмы «Контарини».

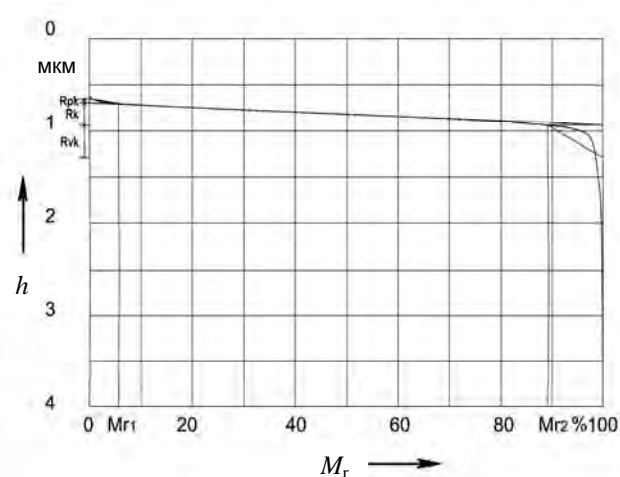
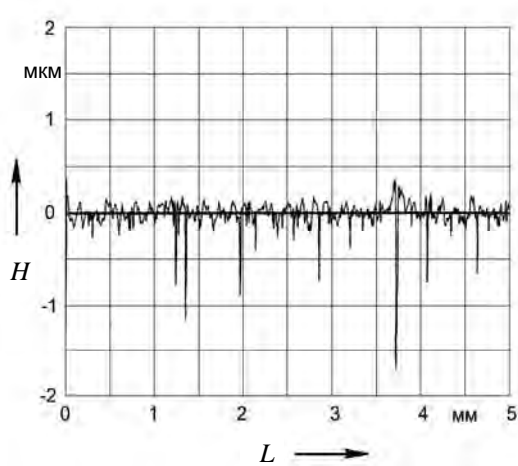
Средняя высота выступов профиля R_{pk} после суперфинишной ПЦО в 3 раза меньше, чем после раскатывания. Достижение такой высоты снижает время приработки поверхностей трения при переходе к стадии нормального изнашивания и почти приближается к величине R_{pk} поверхности, обработанной по итальянской технологии. Уменьшение параметра R_{pk} приводит к уменьшению работы силы трения и интенсивности изнашивания в начальный период контактирования трущихся поверхностей.

Средняя высота центральной области профиля R_k , показывающая прирост материала в центральной области, для поверхности после суперфинишной ПЦО равна $R_k = 0,246$ мкм, а после ППД – $R_k = 0,303$ мкм.

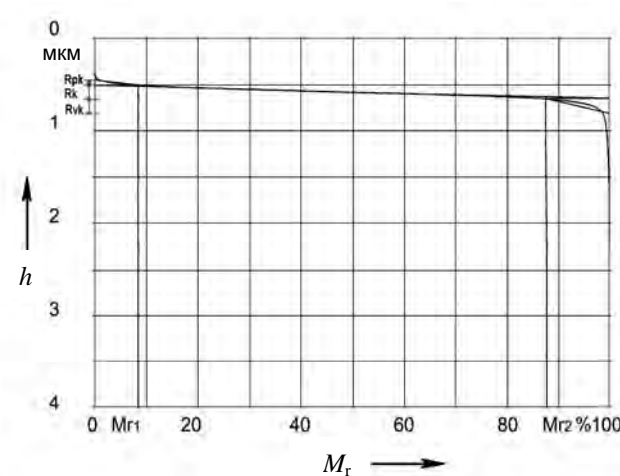
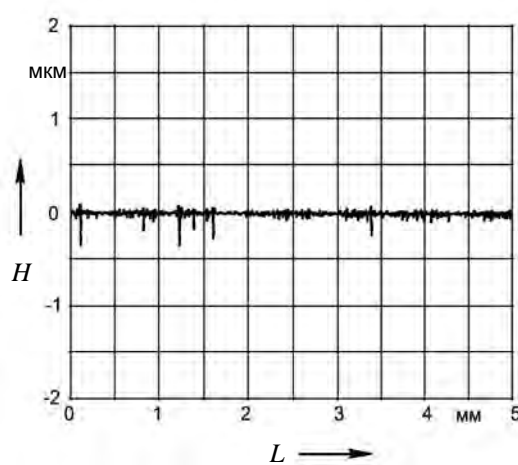
a)



б)



в)



H – высота неровности профиля; L – базовая длина; h – высота над линией впадин; M_r – материальная составляющая

Рисунок 8.12 – Профилограммы поверхностей, обработанных по трем технологиям



Таблица 8.3 – Значения параметров шероховатости обработанных рабочих поверхностей гильз по DIN 4776

Параметры шероховатости по DIN 4776	Способ окончательной обработки рабочей поверхности гильзы			Эксплуатационное свойство, на которое оказывает влияние параметр шероховатости
	ППД	ППД с последующей суперфинишной ПЦО	Итальянская хонингованная гильза	
R_a , мкм	0,11	0,08	0,02	Износостойкость
R_{pk} , мкм	0,137	0,046	0,024	Приработка
R_k , мкм	0,303	0,246	0,073	Несущая способность
$R_{pk} + R_k$, мкм	0,440	0,292	0,097	Износостойкость
A_1 , мм ³ /см ²	0,0007	0,0001	0,0001	Приработка
R_{vk} , мкм	0,4014	0,3663	0,0712	Маслоемкость

У гильзы иностранного производства данный параметр в 3 раза меньше по сравнению со значением этого же параметра после суперфинишной ПЦО [197]. Чем меньше значение R_k , тем большей несущей способностью обладает центральная область микрорельефа, следовательно, рабочая поверхность гильзы итальянского производства обладает наибольшей несущей способностью, ресурс работы гидроцилиндра с такой гильзой будет больше ресурса рассмотренных отечественных аналогов. Однако поверхность гильзы после суперфинишной ПЦО по параметру R_k превосходит поверхность гильзы, обработанной ППД, и в сравнении с ней имеет большую несущую способность, которая позволяет увеличить надежность и долговечность пары трения гильза – поршневое кольцо.

Сумма параметров средней высоты центральной области профиля R_{pk} и средней высоты выступов R_k , характеризующая износостойкость обработанной поверхности, для обработки ППД равна 0,44 мкм, для суперфинишной ПЦО – 0,292 мкм и для обработки по итальянской технологии – 0,097 мкм. Таким образом, износостойкость гильзы гидроцилиндра, обработанной суперфинишной ПЦО, в 1,5 раза выше, чем гильзы после ППД роликами. Однако в сравнении с гильзой итальянского производства, износостойкость почти в 3 раза ниже.

По параметру A_1 , определяющему объем острых пиков в кубических миллиметрах на квадратный сантиметр поверхности и показывающему степени приработанности поверхности трения, поверхность после суперфинишной ПЦО не уступает поверхности, обработанной

фирмой «Контарини» – $A_1 = 0,0001 \text{ мм}^3/\text{см}^2$. Для поверхности после жесткого роликового накатника $A_1 = 0,0007 \text{ мм}^3/\text{см}^2$, т. е. в 7 раз хуже.

Средняя глубина впадин профиля R_{vk} и удельная маслосъемность поверхности после финишной ПЦО соизмеримы с аналогичными параметрами для поверхностей, полученных жестким раскатыванием. В сравнении с итальянской гильзой поверхность после суперфинишной ПЦО обладает маслосъемностью в 4 раза большей. Маслосъемность поверхности после суперфинишной ПЦО при малой шероховатости поверхности по параметру Ra увеличивается за счет создания шарами при ударах сетки микролунок, служащих резервуарами для смазки.

Численные значения маслосъемности, рассчитанные по формуле (8.2), составляют для поверхностей: после суперфинишной ПЦО $Q = 0,0020 \text{ мм}^3/\text{см}^2$, после раскатывания $Q = 0,0029 \text{ мм}^3/\text{см}^2$, после хонингования по итальянской технологии $Q = 0,0005 \text{ мм}^3/\text{см}^2$.

Проведенный сравнительный анализ трех вариантов обработки показывает преимущество поверхности после суперфинишной ПЦО с точки зрения прирабатываемости, несущей способности, повышения износостойкости по сравнению с поверхностью после раскатывания [197]. При этом поверхность, обработанная суперфинишной ПЦО, по этим же эксплуатационным свойствам близка к поверхности, обработанной по итальянской технологии, а по маслосъемности ее превосходит. Следовательно, технология обработки гильз гидроцилиндров, включающая на завершающей операции суперфинишную ПЦО, может быть использована как импортозамещающая при изготовлении гидроцилиндров.

8.6 Предпосылки финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработки рабочих поверхностей корпусов золотниковых коробок и других приравненных к ним деталей

Детали прецизионных пар, например золотниковых, – одни из самых трудоемких в изготовлении среди других деталей гидравлических агрегатов. Диаметральный зазор, в зависимости от размера и назначения прецизионной пары, может быть от 2 мкм до нескольких десятков. Детали прецизионных пар могут иметь возвратно-поступательное, вращательное, возвратно-вращательное перемещения.

Главными требованиями, которые предъявляются к прецизионным парам трения, являются высокая стабильность малых по величине сил трения и высокая герметичность.

Требование малых усилий трения, например, в регулирующих устройствах определяется необходимостью обеспечить высокие свойства чувствительных элементов, следящих за изменением давления или перепадом давления в соответствующих полостях агрегата.

Функции чувствительного элемента обычно выполняет золотник, который находится под воздействием давления жидкости и пружины. Золотник – это подвижная деталь, находящаяся в направляющей (гильзе) любой, независимо от конструкции, прецизионной пары, выполняющей функции регулирующего или распределительного устройства.

Малейшие изменения давления рабочей жидкости должны приводить к перемещениям золотника относительно гильзы и изменениям расхода жидкости через соответствующие каналы, связанные с золотниковой парой. По мере увеличения сил трения между золотником и гильзой минимальное значение прироста давления, на которое реагирует золотник, возрастает. Следовательно, рабочие свойства чувствительного элемента ухудшаются, повышается статическая ошибка системы регулирования.

Большой процент отказов и неисправностей золотниковых пар вызывается повышением трения либо утечками рабочей жидкости через зазоры между деталями, что, как правило, сопровождается повреждением или разрушением их поверхностей. При этом под повреждениями понимаются образующиеся в процессе эксплуатации прецизионной пары любые изменения микрогеометрии, повышающие шероховатость поверхности, и структурные изменения материала деталей.

Увеличение утечек рабочей жидкости через зазоры, вызываемые износом деталей золотниковых пар, происходит постепенно, и связанные с этим отказы не могут быть своевременно выявлены и предупреждены [181].

Для всех золотниковых пар гидравлических агрегатов требование стабильности трения является общим и определяющим их надежность при эксплуатации.

Разрушение поверхностного слоя золотниковых пар трения приводит к увеличению утечек, снижая коэффициент полезного действия гидроагрегата и увеличивая статическую ошибку управляющей аппаратуры.

Повышение микротвердости поверхностного слоя золотниковой пары уменьшает вероятность ее заклинивания при попадании в зазоры твердых частиц, которые в этом случае обычно разрушаются твердыми рабочими поверхностями. Кроме того, повышение твердости уменьшает возможность схватывания материалов [182].

В настоящее время одним из методов защиты поверхностного слоя, является химико-термическая обработка. Ее основные недостатки – высокая энергоемкость, большая длительность и коробление геометрической формы детали, вызываемое ее нагревом и охлаждением.

В отечественном машиностроении самой распространенной обработкой отверстий гильз (корпусов гидрораспределителей) является хонингование. Однако данный способ имеет некоторые недостатки:

- получение низкой шероховатости связано с выполнением нескольких операций, брусками различной зернистости, что, в свою очередь, достаточно трудоемко;

- бруски сильно шаржируют поверхность абразивными зернами, что негативно сказывается на износе рабочей поверхности золотника в гидрораспределителе.

Устранение недостатков видится в использовании финишной упрочняющей ПЦО, которая создает благоприятную форму микронеровностей, повышая износостойкость в золотниковой паре трения и несущую способность поверхности.

Применение финишной упрочняющей ПЦО для обработки внутренних поверхностей отверстий позволит исключить операцию химико-термообработки и улучшить эксплуатационные свойства рабочей поверхности корпусов гидрораспределителей.

8.7 Влияние поверхностного деформирования на усталостную прочность деталей

В процессе эксплуатации детали подвергаются различным нагрузкам (изгиб, кручение, сжатие и др.). Они создают напряжения в материале детали, особенно в поверхностных слоях. Кроме того, из-за несовершенства способов изготовления поверхность детали может иметь вырывы, риски, трещины, вмятины и другие дефекты, являющиеся концентраторами напряжений. Взаимосвязь внешних нагрузок с напряжениями от различных концентраторов создает неблагоприятные условия для работы деталей.

Средствами повышения надежности и долговечности деталей являются технологические методы. Они позволяют в отличие от конструкторских мероприятий формировать качество поверхностного слоя с заданными свойствами.

Способы поверхностного пластического деформирования более простые и удобные по сравнению с химико-термическими и другими процессами, они формируют необходимые свойства поверхностей деталей.

Основное влияние на выносливость деталей оказывают остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое под действием внешних нагрузок. Они превышают предел текучести материала, из которого изготовлена деталь, поэтому ее верхний слой остаточной деформируется. Подповерхностные слои при этом испытывают напряжения, но на уровне предела пропорциональности, т. е. упругих деформаций. Каждому способу упрочняющей обработки свойственна определенная схема наведения остаточных напряжений.

Пневмоцентробежная и импульсно-ударная упрочняющая обработки обусловлены импульсным характером воздействия шаров на обрабатываемую поверхность. Даже на гладкой поверхности ($Ra = 0,04$ мкм) можно обнаружить сетку мелких лунок от шаров после обработки. В поверхностном слое детали возникают остаточные напряжения на определенной глубине, которая определяет границу между наружным и внутренним подповерхностным недеформированным слоями. Этот процесс связан с наведением в верхнем слое остаточных напряжений, знак и величину которых можно изменять в зависимости от ряда факторов.

Установлено, что в процессе накатывания внутренней поверхности маложесткой детали формируется результирующее напряженное состояние при наложении остаточных напряжений на исходные технологические, возникающие от действия внешних сил в результате крепления заготовки. Экспериментальные исследования остаточных макронапряжений и степени упрочнения с учетом режимов обработки и характера крепления заготовок позволили выявить закономерность их формирования и разработать рекомендации, позволяющие снизить погрешность формы тонкостенных цилиндров в процессе их упрочнения.

Известно, что неравномерность процесса релаксации напряжений из-за их переменной величины на различных участках поверхности после механической обработки проявляется в большей степени, чем после пневмоцентробежной. В последнем случае амплитуда и частота ударного воздействия деформирующих элементов обеспечивают искусственное старение обрабатываемых тонкостенных цилиндров. Сложность формирования остаточных макронапряжений в процессе пневмоцентробежной упрочняющей обработки нежестких заготовок требует учета взаимовлияния условий обработки и характера крепления заготовки.

Остаточные технологические напряжения изучались после механической обработки и пневмоцентробежного накатывания. Для экспериментов использовались втулки и гильзы из стали 45 и ХВГ твердостью 31,5...46,5 HRC (внутренний диаметр – 80 мм, наружный – 90 мм).

Предварительная обработка проводилась резцом из твердого сплава марки Т15К6, пневмоцентробежная – на токарно-винторезном станке мод. 1К62.

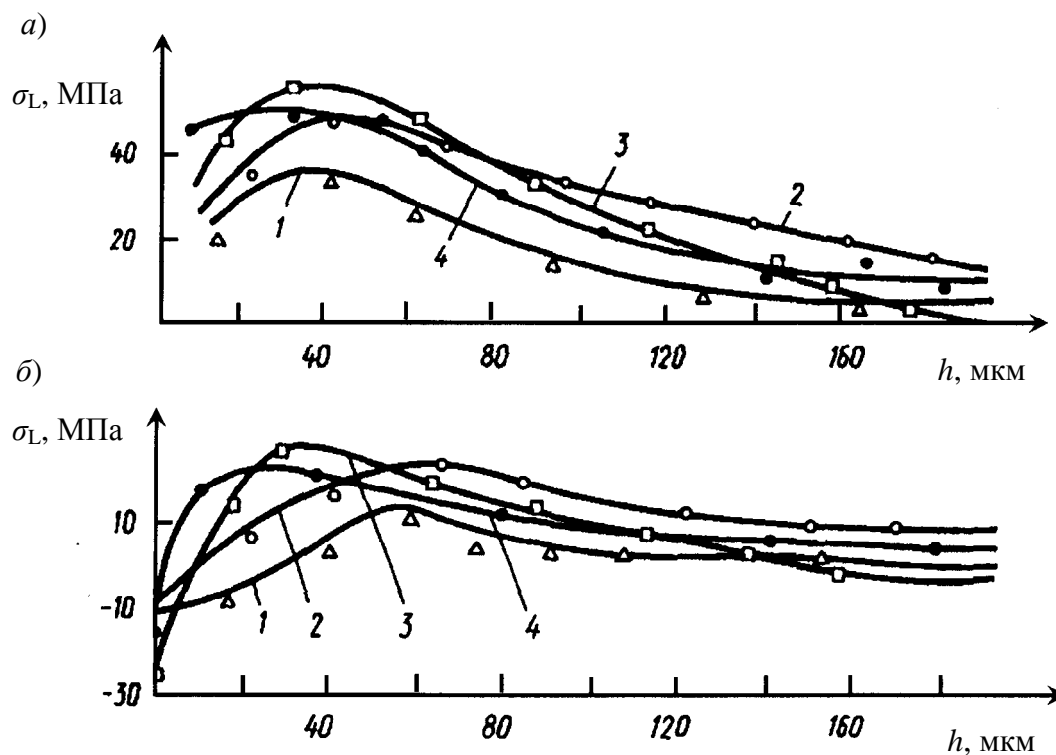
Остаточные напряжения определяли механическим способом, измеряя деформацию образцов. Исследовали характер распределения остаточных напряжений в осевом и поперечном направлениях внутренней поверхности. Расчетную и метрологические схемы выбирали согласно [177]. Для выявления характера распределения остаточных напряжений по глубине внутреннего поверхностного слоя обработанных деталей в осевом направлении электроэрозионным способом вырезали образцы шириной 6 мм и длиной 25 мм.

На рисунке 8.13 представлены результаты экспериментальных исследований. Из рисунка видно, что максимальные остаточные напряжения после обработки резцом располагаются на незначительной глубине от поверхности. В осевом и поперечном направлениях они имеют различный характер. В последнем случае отмечены сжимающие напряжения, переходящие в растягивающие с удалением от обработанной поверхности. Материал заготовки и режимы обработки оказывают существенное влияние на величину напряжений, не меняя при этом характера их распределения как вдоль оси, так и в поперечном направлении.

Усилие зажима знак напряжения не изменяет. При больших усилиях, обеспечивающих некруглость больше 60 мкм, и соотношениях длины обрабатываемого цилиндра к диаметру в пределах 1,5...2,5 знак напряжений в круговом направлении у кольца, вырезанного ближе к свободному торцу от условного сечения, имеет противоположное значение. Это объясняется особенностью деформирования тонкостенных цилиндров при закреплении. Остаточные напряжения в осевом направлении после обработки резцом с изменением усилия зажима изменяются несущественно (100...600 МПа).

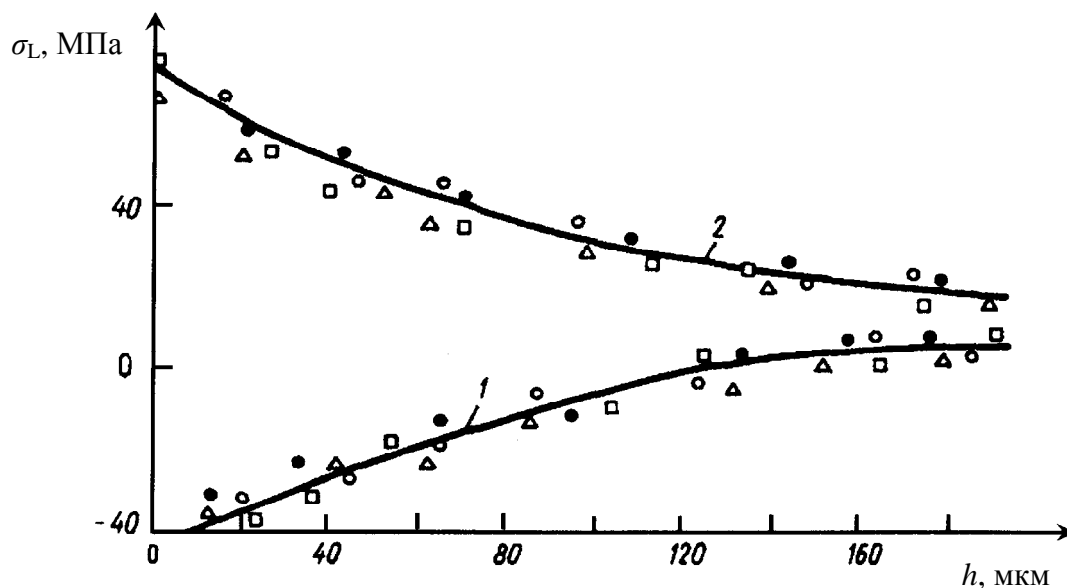
Как видно из рисунка 8.14, пневмоцентробежная обработка изменяет знак и величину остаточных напряжений. Остаточные сжимающие напряжения образуются в осевом направлении, растягивающие – в поперечном.

В случае крепления обрабатываемой заготовки в кулачках с упругими элементами режимы предварительной обработки и материал заготовки существенного влияния на формирование окончательных остаточных напряжений в процессе пневмоцентробежной обработки не оказывают.



a – вдоль оси после растачивания (1, 2 – сталь 45; 3, 4 – сталь ХВГ; $S = 0,07$ мм/об);
б – в поперечном направлении после растачивания (1, 4 – $n = 1000$ мин⁻¹; 2, 3 – $n = 630$ мин⁻¹)

Рисунок 8.13 – Распределение макронапряжений во внутреннем поверхностном слое тонкостенных цилиндров



1 – вдоль оси; 2 – в поперечном направлении (сталь 45 и ХВГ; режимы процесса упрочняющей обработки: $S = 0,07$ мм/об; $n = 1000$ мин⁻¹; $P_1 = 0,4$ МПа; $d_{ш} = 12,7$ мм)

Рисунок 8.14 – Распределение макронапряжений во внутреннем поверхностном слое тонкостенных цилиндров при пневмоцентробежной обработке

Рисунок 8.14 свидетельствует о том, что остаточные напряжения образцов из сталей 45 и ХВГ, обработанных резцом с различными режимами, имеют незначительный разброс по величине.

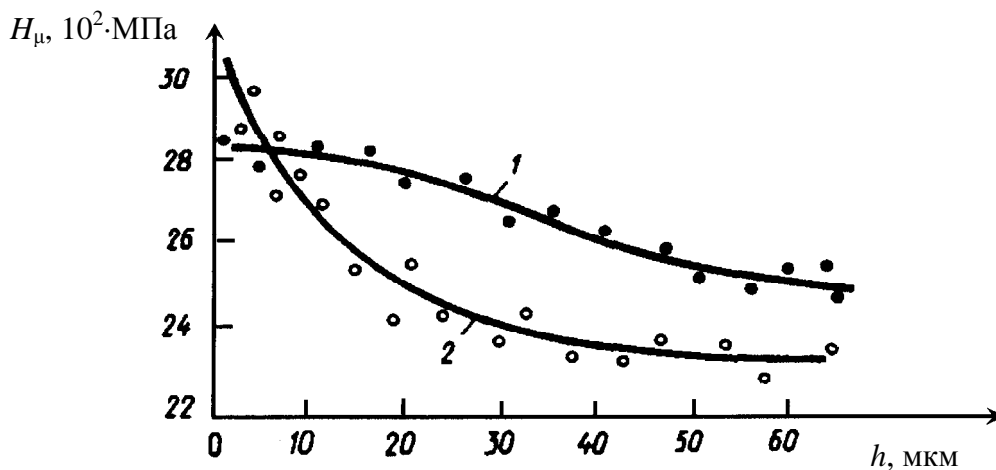
Жесткое крепление заготовки в процессе пневмоцентробежной обработки вызывает значительный разброс значений остаточных напряжений, особенно в осевом направлении. Наличие растягивающих напряжений в поперечном направлении можно объяснить изменением формы внутренней поверхности после снятия нагрузки от усилия зажима, вызванного упругим восстановлением формы наружной поверхности и некоторым искажением внутренней. Это явление в сочетании с поперечным силовым воздействием преимущественно в направлении нормали к обрабатываемой поверхности способствует перераспределению и формированию остаточных напряжений в процессе пневмоцентробежного раскатывания.

Наличие преобладающих сжимающих напряжений в осевом направлении обусловлено «свободным» деформированием внутренней поверхности при незначительных опорных реакциях в зоне контакта заготовки с поверхностью кулачков. Наибольшее динамическое усилие деформирования в направлении нормали к обрабатываемой поверхности несоизмеримо с осевым и тангенциальным.

Из рисунка 8.15 видно, что микротвердость в поверхностном слое после пневмоцентробежной обработки изменяется по-разному для сталей 45 и ХВГ.

Характер накопления деформаций в микрообластях поверхностного слоя является равномерным, он зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Снижение уровня локализации пластических деформаций, связанных с разнонаправленным силовым воздействием на исходные микронеровности, обеспечивает равномерное протекание пластических сдвигов. Это способствует образованию однородной дисперсной структуры и более равномерному распределению внутризеренных напряжений в поверхностном слое в процессе работы детали под нагрузкой.

Установлена линейная связь между остаточными напряжениями сжатия и повышением предела выносливости σ_{-1} при упрочнении поверхностным деформированием незакаленных сталей [176]. У цветных металлов (алюминий, магний и др.) предел выносливости после упрочняющей обработки ниже, чем у сталей (не более 25...35 % от основного неупрочненного материала) [177].



1 – сталь ХВГ; 2 – сталь 45 (режимы процесса обработки: $S = 0,07$ мм/об; $n = 1000$ мин⁻¹; $P_1 = 0,4$ МПа; $d_{ш} = 12,7$ мм)

Рисунок 8.15 – Изменение микротвердости в поверхностном слое после пневмоцентробежной обработки

Упрочнение маложестких заготовок сопровождается невысоким усилием поверхностного деформирования. Это характерно для процессов пневмоцентробежной и импульсно-ударной обработок и алмазного выглаживания. Увеличение усилия выглаживания до определенных значений приводит к повышению предела выносливости [179]. Алмазное выглаживание и другие равнозначные ему процессы повышают микротвердость и создают остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое. Увеличение σ_{-1} после алмазного выглаживания образцов из стали Х15Н5Д2Т ($R_{сф} = 2$ мм, $S = 0,05$ мм/об, $v = 100$ м/мин, $i = 1$) с усилием 100, 250, 350 Н/мм² составило 580...670 МПа. Предел выносливости существенно повышается при комбинированном упрочнении, например, после азотирования или цементации поверхности детали с последующим алмазным выглаживанием [178].

Эффективность различных методов поверхностного деформирования отражена в таблице 8.4, данные которой свидетельствуют о том, что предел выносливости можно повысить на 30...90 %. Основанием для этого является наличие остаточных напряжений сжатия после упрочняющей обработки.

Повышение усталостной прочности деталей зависит не только от рассмотренных факторов, но и от микрогеометрии поверхности детали.

При обработке маложестких деталей (турбинных лопаток из титанового сплава 48-T2) по трем независимым технологическим процессам (шлифование, обкатывание, вибронакатывание) установлено,

что предел выносливости шлифованных образцов $\sigma_{-1} = 255$ МПа, обкатанных – 294 МПа, вибронкатанных – 334 МПа. Общее повышение предела выносливости составило 20 % [178].

Таблица 8.4 – Усталостная прочность образцов, обработанных различными способами [179]

Марка материала	Метод обработки	Режим упрочнения				σ_{-1} , МПа	Повышение σ_{-1} , %
		P , Н	S , мм/об	v , м/мин	i		
X15H5Д2Т	Полирование	350	0,05	100	1	450	100
	Алмазное выглаживание ($R_{сф} = 2$ мм)					670	149
45ХНМФА	Шлифование	200	0,08	3	2	230	100
	Алмазное выглаживание ($R_{сф} = 2$ мм)					440	191
18Х2Н4ВА	Шлифование	200	0,08	3	2	260	100
	Алмазное выглаживание ($R_{сф} = 2$ мм)					390	150
X12H2BMH	Шлифование	30	0,06	63	2	720	139
	Алмазное выглаживание ($R_{сф} = 3$ мм)					–	–

Для выявления соотношения доли усталостной прочности от остаточных сжимающих напряжений и микрорельефа проведен следующий эксперимент. Вибронкатанные образцы подвергались отпуску в среде аргона при 650 °С в течение 1,5 ч. Предел выносливости снизился с 334 до 285 МПа, что составило 11 %. Таким образом, на долю микрорельефа приходится 9 % повышения предела выносливости. Ю. Г. Шнейдер [35] отмечает, что радиус закругления впадины неровностей играет существенную роль. Впадины являются концентраторами напряжений. Радиусы закруглений впадин и других параметров для различных процессов приведены в [12]. Площадь, занимаемая вибронкатанными канавками с их оптимальными значениями и видами микрорельефа, также способствует повышению большинства эксплуатационных характеристик деталей: герметичности, плавности хода, бесшумности, сопротивлению ползучести, контактной выносливости, коррозионной стойкости и др.

Технологическая наследственность способов упрочняющей обработки оказывает решающее влияние на важнейшие эксплуатационные показатели рабочих поверхностей деталей.

9 Технико-экономическая эффективность пневмовибродинамической обработки

9.1 Разработка опытно-промышленного образца инструмента для обработки сферической поверхности и проведение поисковых исследований

С целью определения рациональных режимов процесса пневмовибродинамической обработки и разработки рекомендаций для внедрения ПВДО на заводе были изготовлены по серийной технологии 10 наружных колец машины МоАЗ-7405 с обеспечением технических условий (ТУ) чертежа.

Обработка осуществлялась на токарно-винторезном станке мод. 16К20 инструментом, общий вид которого изображен на рисунке 9.1. Накатник устанавливался на станке посредством оправки 1 в резцедержатель. На оправке смонтирован кожух 2 с расположенным в нем диском 3 и распорными кольцами 4 и 5, ограниченными диском 6 и зафиксированными гайкой 8. Взаимное положение дисков определяется штифтом 7. Осевой канал оправки заглушен пробкой 9. Накатник оснащен шарами диаметром 13,49 мм в количестве 26 шт. [65, 66]. Чертеж наружного кольца дан на рисунке 9.2. Материал кольца – сталь 18 ХГТ с твердостью $\leq 62 \text{ HRC}$.

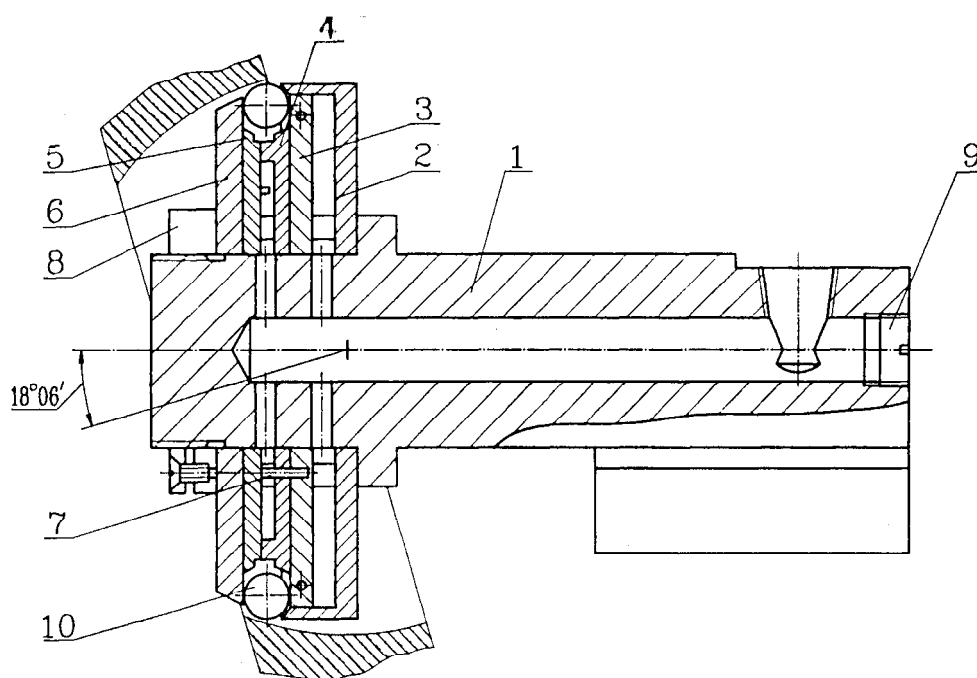


Рисунок 9.1 – Пневмонакатник

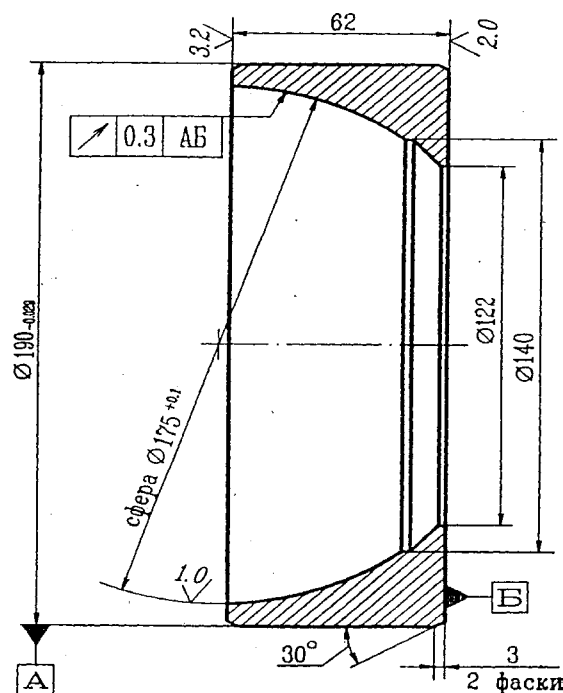


Рисунок 9.2 – Кольцо наружное

Замеры исходной шероховатости поверхностей заготовок колец наружных на профилометре-профилографе (фирма-изготовитель приборов «Суртроник» (Surtronic, Дания)) показали, что она находится в пределах 0,6...1 мкм (по данным ОАО «Гомельский литейный завод «ЦЕНТРОЛИТ», ОАО «Минский подшипниковый завод»). Режимы процесса пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки и шероховатость поверхностей колец наружных представлены в таблице 9.1.

Параметры шероховатости поверхностей получены при постоянной частоте вращения заготовки 12,5 мин⁻¹. Направление вращения заготовки (шпинделя станка) и деформирующих шаров попутное.

В зависимости от требуемой шероховатости поверхности $Ra = 0,2...0,5$ мкм величина исходной шероховатости должна составлять после шлифования $Ra = 0,5...1$ мкм, продолжительность машинного времени $t = 1...4$ мин.

Измерения шероховатости поверхности в пределах $Ra = 0,2...0,3$ мкм соответствуют шероховатости изделий аналогичного класса, выпускаемых специализированными подшипниковыми заводами на дорогостоящих станках суперфинишной обработки.

Для исследования и расчета маслосъемности рабочей поверхности колец использована методика [168].

Таблица 9.1 – Шероховатость поверхностей колец (сферы) после ПЦО, режимы процесса обработки

Величина замеров шероховатости поверхностей Ra , мкм			Давление сжатого воздуха в начале трубопровода P_1 , МПа	Время обработки t , мин
0,45	0,2	0,25	0,45	16
0,20	0,25	0,15	0,45	4
0,34	0,25	0,15	0,45	1
0,35	0,3	0,55	0,60	4
0,32	0,4	0,30	0,40	4
0,50	0,4	0,50	Поверхность заготовки не раскатана	
0,28	0,37	0,35	0,45	2
0,23	0,25	0,25	0,45	8
0,33	0,25	0,25	0,60	1
0,25	0,25	0,22	0,60	2

В качестве образцов были выбраны два кольца наружных седельно-сцепных устройств (ССУ) с почти одинаковой шероховатостью поверхности. Шероховатость поверхности одного из колец после шлифования и ПЦО $Ra = 0,4$ мкм; шероховатость кольца, шлифованного по серийной технологии, $Ra = 0,58$ мкм.

Измерения шероховатости поверхностей для кольца после ПЦО производились на базовой длине 10,17 мкм, а для шлифованного – 12,55 мкм, о чем свидетельствуют приведенные цифровые данные (рисунки 9.3 и 9.4).

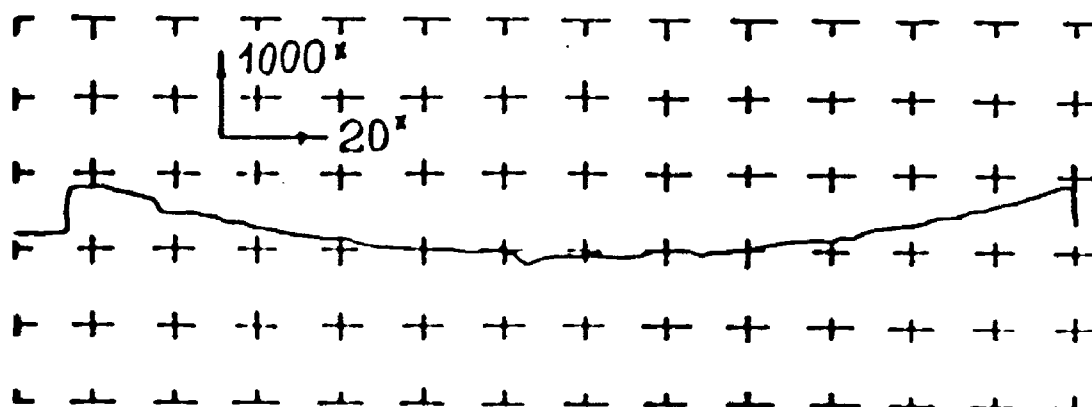


Рисунок 9.3 – Профилограмма сферической поверхности кольца ССУ и численные значения опорной длины профиля t_p после операции шлифования

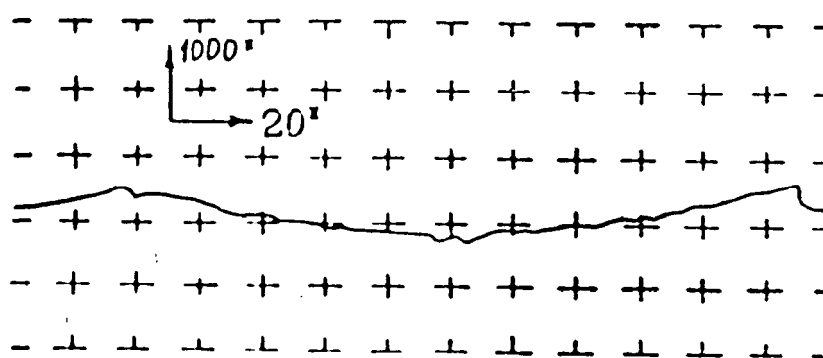


Рисунок 9.4 – Профилграмма сферической поверхности кольца ССУ и численные значения опорной длины профиля t_p после ПЦО

Определение удельной маслостойкости поверхности осуществлено в соответствии с рекомендациями немецкого стандарта DIN 4776 [149].

Рассмотрим опорные кривые Аббота-Файрстоуна для отверстия кольца шарнирного подшипника скольжения (материал – сталь 18ХГТ, твердость 62...64 HRC) после шлифования, предшествующего ПВДО, с $Ra = 0,58$ мкм (рисунок 9.5) и после ПВДО с $Ra = 0,4$ мкм (рисунок 9.6).

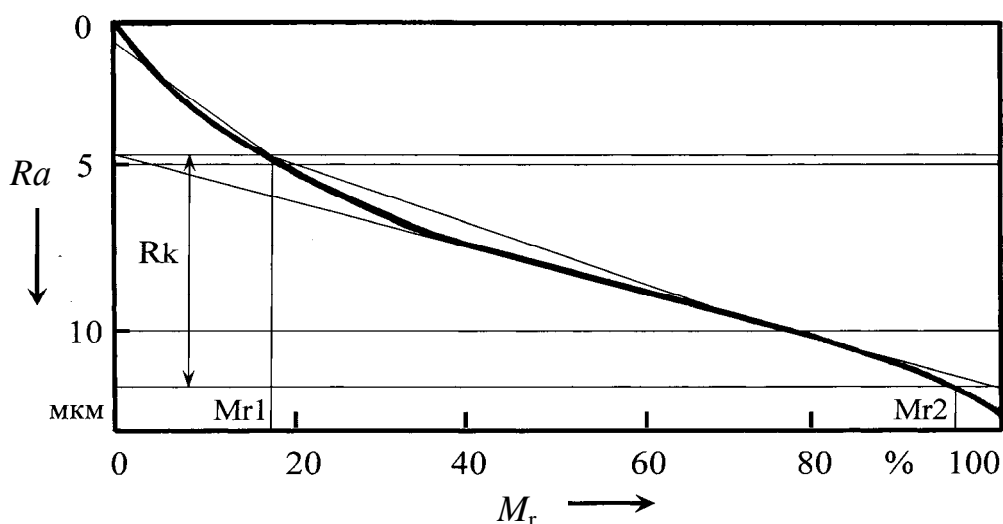


Рисунок 9.5 – Кривая Аббота-Файрстоуна для шлифованной поверхности

Для шлифованной поверхности имеем: $R_{pk} = 3,8$ мкм; $R_k = 7,3$ мкм; $R_{vk} = 0,8$ мкм; $M_{r1} = 17$ %; $M_{r2} = 94$ %. Для поверхности после ПВДО: $R_{pk} = 1,9$ мкм; $R_k = 6,8$ мкм; $R_{vk} = 1,1$ мкм; $M_{r1} = 12$ %; $M_{r2} = 94$ %.

Примечание – Определение R_{pk} и R_{vk} приблизительное, т. к. точное возможно лишь с использованием современных измерительных приборов фирмы «Тайлор Хобсон» (Taylor Hobson).

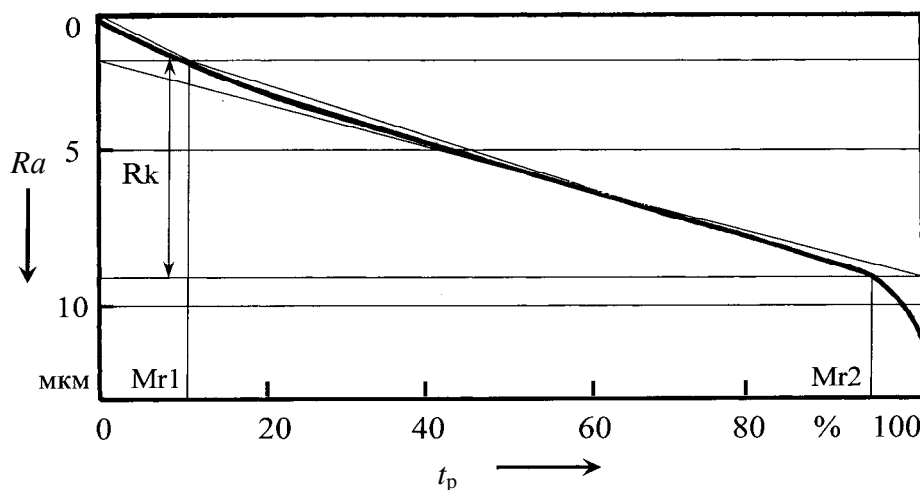


Рисунок 9.6 – Кривая Аббота-Файрстоуна для поверхности после ПВДО

Рассчитаем маслосъемность по формуле

$$Q = \frac{R_{vk}}{20} \left(\frac{100 \% - M_{r2}}{100 \%} \right). \quad (9.1)$$

$$Q_{\text{шлиф.}} = \frac{1}{20} \cdot 0,8 \cdot 0,06 = 0,0024 \text{ мм}^3/\text{см}^2;$$

$$Q_{\text{ПВДО}} = \frac{1}{20} \cdot 1,1 \cdot 0,06 = 0,0033 \text{ мм}^3/\text{см}^2.$$

Поверхность после ПВДО является более износостойкой, т. к. параметры R_{pk} и R_k имеют меньшие значения, а маслосъемность больше на 37,5 %.

Замеры твердости материала поверхности двух деталей (колец) показали, что у шлифованной детали она составляла HV : 714,6; 714,6; 759 (H_1). После ПВДО HV : 759; 809,9; 809,9 (H_2). В целом при переводе на HRC : $H_1 = 61 \dots 62$; $H_2 = 62 \dots 63$.

9.2 Технико-экономические показатели процесса пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки

Комплексные показатели известных способов поверхностного деформирования приведены в таблице 9.2, а показатели режимов процесса пневмоцентробежной обработки в сравнении с показателями после алмазного выглаживания – в таблице 9.3.

Таблица 9.2 – Комплексные показатели способов обработки внутренних поверхностей вращения нежестких деталей поверхностным деформированием

Способ обработки	Твердость обрабатываемого материала <i>HRC</i>	Минимальный диаметр обработки d_{\min} , мм	Шероховатость обработанной поверхности <i>Ra</i> , мкм	Глубина наклепа t_n , мм	СОЖ	Требование к жесткости СПИД
Алмазное выглаживание	62,9...64,9	15	0,32...0,08	0,01...0,2	Да	Оговаривается
Виброраскатывание	41,6...46,4	25	1,25...0,04	0,1...0,2	Да	Не оговаривается
Струйно-абразивная обработка	62,9...64,9	10	Снижается с 10...15 до 2,5...7	–	Нет	Не оговаривается
Гидродробеструйная обработка	62,9...64,9	–	1,25...0,63 сохраняется от предыдущей обработки	0,08...0,15	Да	Не оговаривается
		20	Снижается с 5...1,25 до 2,5...1,25			
Пневмоцентробежная обработка	62,9...64,9	15	2,5...0,03	0,01...0,2	Нет	Не оговаривается
ППД жесткими многошариковыми раскатниками	62,9...64,9	40	0,1...0,08	0,05...0,3	Да	Не оговаривается

Таблица 9.3 – Режимы процессов обработки внутренних цилиндрических поверхностей алмазным выглаживанием и пневмоцентробежным накатыванием

Обрабатываемый материал	Предшествующая технологическая операция и шероховатость поверхности Ra , мкм	Скорость обработки v , м/мин	Подача инструмента S , мм/об	Шероховатость поверхности после обработки Ra , мкм	Увеличение производительности процесса раскатывания по сравнению с алмазным выглаживанием
<i>Алмазное выглаживание</i>					
Сталь незакаленная	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	50...100	0,02...0,05	0,16...1,25	–
Сталь закаленная, HRC до 30	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	50...100	0,02...0,05	0,16...1,25	–
Сталь закаленная, 30...35 HRC	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	100...150	0,02...0,05	0,32...1,25	–
Сталь закаленная, 35...50 HRC	Шлифование, 0,32...1,25	100...150	0,02...0,05	0,32...1,25	–
	Шлифование, 0,63...1,25			0,08...0,32	
Сталь закаленная, $\leq 64 HRC$	Шлифование, 0,63...1,25	100...180	0,02...0,05	0,16...0,32	–
Сталь 35	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	125...500	0,07...1	0,16...1,25	70
Сталь ХВГ, HRC до 30	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	300...500	0,07...1	0,16...1,25	75
<i>Пневмоцентробежное накатывание</i>					
Сталь 45, 30...35 HRC	Чистовое, тонкое растачивание, 1,25...2,5	400...500	0,15...1	0,16...1,25	58
		125...400	0,07...0,11		
Сталь ХВГ, 35...40 HRC	Тонкое растачивание, шлифование, 0,63...1,25	25...30	0,28...0,40	0,32...0,63	2
		6...25	0,07...0,28	0,05...0,32	–
Сталь 40, 40...57 HRC	Тонкое растачивание, шлифование, 0,63...1,25	6...25	0,07...0,28	0,05...0,32	–
Сталь ШХ15, $\leq 64 HRC$	Тонкое шлифование, 0,32...1,25	6...20	0,1...0,4	0,15...0,30	2

Одним из важных экономических показателей процесса пневмо-вибродинамической обработки является производительность. Формула основного машинного времени обработки для внутренних или наружных поверхностей вращения одинакова:

$$T_{\text{м}} = \frac{L_{\text{р.х.}}}{n \cdot S_{\text{пр}}}, \quad (9.2)$$

где $L_{\text{р.х.}}$ – полная длина рабочего хода инструмента, мм;

n – частота вращения обрабатываемой детали, мин^{-1} ;

$S_{\text{пр}}$ – продольная подача инструмента [12], мм/об.

Обозначив в формуле (9.2) частоту вращения детали через скорость обработки (скорость раскатывания), получим формулу машинного времени

$$T_{\text{м}} = \frac{L_{\text{р.х.}} \cdot \pi \cdot D}{1000v \cdot S_{\text{пр}}}, \quad (9.3)$$

где D – диаметр упрочняемой поверхности детали, мм.

9.3 Результаты внедрения пневмоцентробежной обработки в производство

Впервые опытное внедрение пневматических шариковых накатников центробежного действия было осуществлено на МоАЗ, промышленное – на Минском заводе «Ударник» (ныне ОАО «АМКОДОР» – управляющая компания холдинг»).

На МоАЗ были проведены апробирование и доводка пневматических однорядных и многорядных накатников центробежного действия, определены технологические возможности нового способа для упрочняющей обработки маложесткой детали – цилиндра амортизатора подвески (материал – сталь 45 по ГОСТ 1050-88); внутренний диаметр $80^{+0,06}$ мм, наружный – $93_{-0,87}$ мм, шероховатость внутренней поверхности $Ra = 0,5$ мкм, длина детали $l_{\text{д}} = 282$ мм. С обеих сторон по наружному диаметру на длине 25 мм толщина стенки составляла 5 мм.

Перед накатыванием отверстия каждая заготовка была окончательно обработана в цеховых условиях по чертежу, за исключением отверстия, имевшего после полустогового растачивания размер внутреннего диаметра $(79,5 \pm 0,1)$ мм. Чистовое растачивание цилиндра (диаметр $(80 \pm 0,02)$ мм)

на станке мод. 163 осуществляли в трехкулачковом патроне диаметром 320 мм с применением удлиненных кулачков. Базой для установки заготовки служила ее наружная поверхность. Режимы чистового растачивания: $n_d = 500 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,1 \text{ мм/об}$, $t_{\text{рез}} = 0,3 \text{ мм}$, $R_z = 10 \dots 40 \text{ мкм}$.

Раскатывание внутренней поверхности заготовок проводилось на станке мод. 163, как и чистовое растачивание, с использованием прежней схемы базирования и установки детали.

Пневматический шариковый раскатник крепится в консольной оправке посредством резьбового соединения, а оправка – в резцедержателе станка. Через осевое отверстие в ней от крана управления, соединяющего инструмент с пневмосетью завода, сжатый воздух подается в камеру расширения корпуса раскатника к деформирующим элементам. Характеристика однорядного пневматического шарикового раскатника приведена в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Основные параметры однорядного пневматического шарикового инструмента для обработки отверстий диаметром 80 мм

Наименование параметра	Величина
Диаметр обрабатываемого отверстия $D_{\text{отв}}$, мм	80
Наружный диаметр инструмента $D_{\text{и}}$, мм	79,6
Диаметр шаров $d_{\text{ш}}$, мм	12,7
Количество рабочих тел – шаров $z_{\text{ш}}$, шт.	16
Диаметр сопел $d_{\text{с}}$, мм	4
Количество сопел $z_{\text{с}}$, шт.	4
Осевой зазор δ , мм	0,6
Радиальный зазор γ , мм	5

Режимы процесса пневмоцентробежной упрочняющей обработки: $P = 0,7 \text{ МПа}$, $n_d = 1250 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,1 \dots 0,3 \text{ мм/об}$, $i = 1 \dots 2$ раза, $Ra = 0,63 \dots 0,32 \text{ мкм}$.

Установлено, что исходная величина шероховатости под накатывание $R_z = 40 \dots 10 \text{ мкм}$ не способствует производительной обработке, хотя и отмечено некоторое повышение качества поверхности по сравнению с качеством поверхности, полученной с использованием известных методов ППД. Дефекты поверхности, такие как шелушение, вырывы, а также неоднородность микрогребешков поверхности, обычно невидимые после ее упрочнения жесткими шариковыми или роликовыми накатниками, легко обнаруживаются визуально после пневмоцентробежной обработки.

Таким образом, это более совершенный технологический процесс по сравнению со шлифованием и последующим полированием поверхности, применявшимися на заводе.

Совершенствование конструкции цилиндра амортизатора подвески привело к необходимости соблюдения следующих параметров: твердость $27...32 HRC$, $Ra = 0,32...0,16$ мкм. После чистового растачивания детали на токарно-винторезном станке исходная шероховатость поверхности Ra составляла $3...1,25$ мкм. Режимы пневмоцентробежной упрочняющей обработки S находились в пределах $0,1...0,13$ мм/об. Остальные параметры не изменялись.

После достижения шероховатости поверхности $Ra = 0,32...0,18$ мкм два дополнительных прохода двухрядным накатником ($d_{ш} = 9,5$ мм, $d_c = 2$ мм, $z_c = 4$) на этих режимах обеспечивали $Ra = 0,16...0,08$ мкм. Величина остаточной деформации после упрочнения составляла $0,025...0,03$ мм на диаметр. Производительность труда при новом способе увеличилась в 7 раз по сравнению со шлифованием и последующим полированием поверхности. В процессе доводки инструмента, поисков режимов было изготовлено 705 цилиндров амортизатора подвески и сдано на сборку.

Результаты работы подтвердили вывод о целесообразности использования пневмоцентробежной упрочняющей обработки нежестких деталей. Установлено, что оптимальной исходной шероховатостью поверхности под накатывание является $2,5...1,25$ мкм. После ПЦО обеспечивается шероховатость поверхности $Ra = 0,32...0,08$ мкм.

По сравнению с алмазным выглаживанием производительность нового способа обработки с применением пневмонакатника оказалась выше.

Следует отметить, что замена вследствие ПЦО гильз амортизатора подвески на деформационное упрочнение с использованием жесткого роликового накатника привела к необходимости расширения поля допуска до $0,08$ мм вместо $0,06$ мм, т. к. достичь такой точности из-за остаточных деформаций гильзы стало невозможно. Однако это позволило повысить производительность до минутной подачи 350 мм/мин.

Изложенное позволяет сделать вывод о перспективности использования ПЦО гильз и приравненных к ним изделий с более высокими требованиями, т. е. по шестому-седьмому квалитетам точности, в отличие от накатывания поверхности жесткими роликовыми накатниками, обеспечивающими лишь восьмой квалитет точности. Следует отметить, что при тонком растачивании гильзы возможна ПЦО с подачами, превышающими подачи для роликовых накатников.

Впервые промышленное внедрение инструментов пневмо-раскатников центробежного действия осуществлено для упрочняющей обработки поверхностей шести отверстий в корпусе промежуточного редуктора (рисунок 9.7), который представляет собой неравножесткую сварную конструкцию.

В каждой из боковых стенок корпуса расположено восемь фланцев, внутри которых находится восемь цилиндрических отверстий диаметрами 150 Н7, 170 Н7, 190 Н7.

Согласно чертежу, шероховатость поверхностей отверстий Ra составляла 2,5 мкм; овальность и конусообразность – не более 0,02 мм; непараллельность и перекося осей отверстий – не более 0,05 мм; несоосность отверстий во фланцах передней и задней боковин корпуса – не более 0,05 мм.

Окончательной технологической операцией обработки отверстий было чистовое растачивание на горизонтально-расточном станке мод. 2Б22 с обеспечением ТУ чертежа. Однако опыт эксплуатации машин, в частности подшипниковых узлов, показывает, что они преждевременно выходили из строя.

С вводом дополнительной технологической операции – пневмо-центробежного раскатывания поверхностей отверстий после их чистового растачивания на этом же станке – была решена проблема надежности и долговечности работы подшипниковых узлов в редукторе. Результатом раскатывания явилось увеличение опорной поверхности под подшипники и создание ее наклепа. Шероховатость поверхности после раскатывания снизилась до 1,25...0,63 мкм.

9.4 Результаты внедрения импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей в производство

На основе использования импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки (ИУ ПВДО) разработана новая технология ремонта направляющих станин токарно-винторезных станков нормальной точности, внедренная на ОАО «Могилевлифтмаш» [62]. Технология включает одну операцию механической обработки, содержащую три технологических перехода, осуществляемых за один установ заготовки на продольно-строгальном или продольно-фрезерном станке.



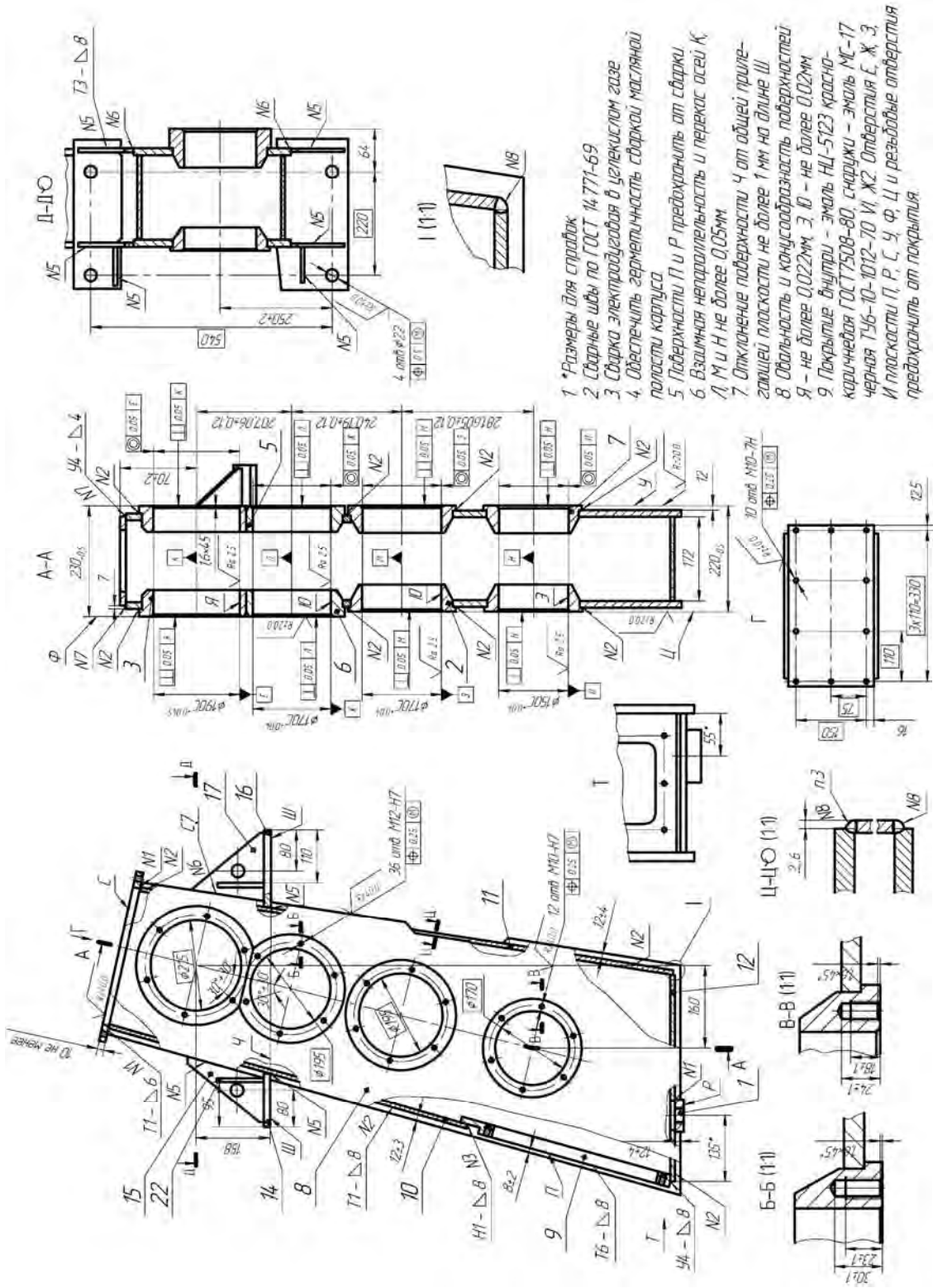


Рисунок 9.7 – Чертеж корпуса промежуточного редуктора

1 Чистовая лезвийная обработка однозубой фрезой-«летучкой», оснащенной вставкой (ножом) из эльбора, устанавливаемой на валу шлифовальной головки продольно-строгального или на шпинделе продольно-фрезерного станка (припуск на обработку – 0,6...0,7 мм, подача стола станка – 1250 мм/мин).

2 Тонкая лезвийная обработка указанной фрезой (припуск на обработку – 0,05 мм, подача стола станка – 900 мм/мин).

3 Упрочняющая ИУ ПВДО пневматическим шариковым накатником, устанавливаемым в резцовой головке продольно-строгального или на шпинделе продольно-фрезерного станка (подача стола станка – 80 мм/мин) (рисунок 9.8).

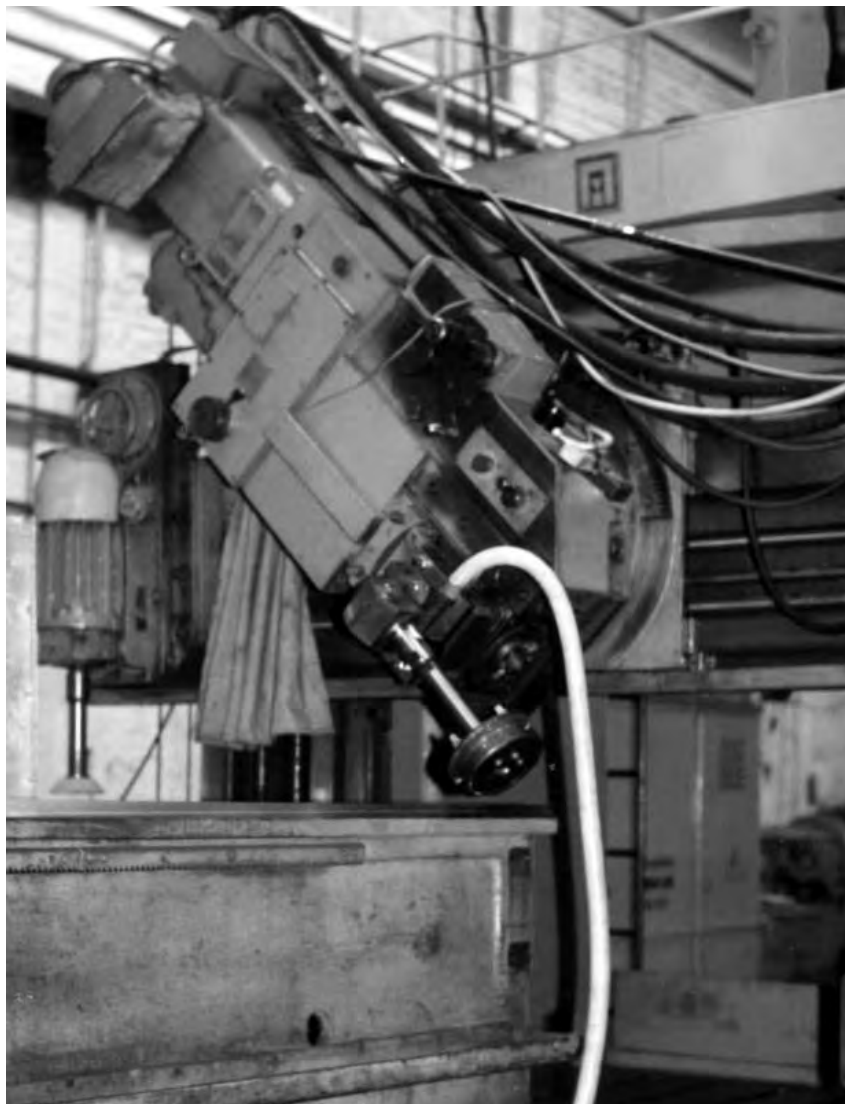


Рисунок 9.8 – Фотография ИУ ПВДО направляющих поверхностей станины станка

Особенностью режущей части однозубой фрезы является наличие прямолинейной зачистной режущей кромки, располагаемой параллельно обрабатываемой поверхности. При этом чем длиннее зачистная кромка, тем выше подача, при которой достигается требуемый параметр шероховатости поверхности.

Применяя фрезерование вместо шлифования, можно достигнуть значительного повышения (до 2...3 раз) производительности обработки, параметр шероховатости обработанной поверхности при этом составит $Ra = 0,63...1,25$ мкм, что соответствует нормативам [18] для станин станков нормальной точности.

Кроме того, тонкая лезвийная обработка позволяет решать следующие задачи:

- исключает шаржирование обработанной поверхности микроабразивом (в отличие от шлифования);
- создает более однородную поверхность по шероховатости.

Направляющие станин станков после ремонта по новой технологии с использованием тонкого фрезерования и ИУ ПВДО по точности соответствуют ГОСТ 18097-93.

За год работы износ направляющих станины в местах перемещения каретки составил:

- для направляющих, ремонт которых производился с использованием упрочняющей ИУ ПВДО, – 0,03...0,045 мм на отрезке в 300 мм;
- для направляющих, ремонт которых производился по заводской технологии (шлифование с последующим подшабриванием), – 0,05...0,07 мм на отрезке в 300 мм.

Сравнительная характеристика величин износа полученных шлифованием и ИУ ПВДО за год двухсменной работы направляющих станин токарно-винторезных станков представлена в таблице 9.5.

Предельно допустимый износ направляющих токарных станков (для участка с наибольшим износом) в зависимости от допуска диаметрального размера обтачиваемой поверхности Δd , мкм, и длины обтачивания L , мм, определяется по формуле [152]

$$U_{\max} = 320 \frac{\Delta d}{L} = 320 \frac{160}{300} = 170 \text{ мкм.} \quad (9.4)$$

Таблица 9.5 – Сравнительная характеристика величин износа направляющих станин токарно-винторезных станков

Способ обработки направляющих, материал и твердость	Модель станка	Вид обработки заготовок	Допустимая величина износа по нормативам*, мм	Фактическая величина износа, мм	Износостойкость по сравнению с ИУ ПВДО
Шлифование с охлаждением (направляющие закаленные) СЧ28 HRC 50**	1К62	Черновая	0,03	0,03	Соответствует ИУ ПВДО
Шлифование с охлаждением (направляющие незакаленные) СЧ21 HB 180**	1А62	Черновая	0,05...0,07	0,05...0,07	Уменьшается в 2,3...2,5 раза
Тонкое фрезерование с последующей ИУ ПВДО (направляющие незакаленные) СЧ21 HB 180**	16А20Ф3	Черновая	–	0,02...0,03	–
Шлифование с охлаждением (направляющие закаленные) СЧ28 HRC 50**	1К62	Черновая и чистовая	0,012	0,012	Соответствует ИУ ПВДО
Шлифование с охлаждением (направляющие незакаленные) СЧ21 HB 180**	1А62	Черновая и чистовая	0,03...0,05	0,03...0,05	Уменьшается в 3...5 раз
Тонкое фрезерование с последующей ИУ ПВДО (направляющие незакаленные) СЧ21 HB 180**	16А20Ф3	Черновая и чистовая	–	0,01	–

Примечание – * – из [184]; ** – материал суппорта – СЧ15, СЧ21 незакаленный; *** – материал суппорта – текстолит марки ПТ ГОСТ 5-78

Зная характер протекания износа направляющих и величину предельно допустимого износа для данной модели станка, можно определить срок службы станка до ремонта. Для станка, направляющие которого отремонтированы по заводской технологии, срок службы составит 2 года и 5 месяцев, по новой технологии – 3 года и 9 месяцев. Таким образом, внедрение новой технологии ремонта направляющих позволяет повысить срок службы станка в 1,6 раза.

Кроме этого, из технологии ремонта полностью исключается трудоемкая операция – шабрение.

9.5 Импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка нежестких штоков и ее эффективность

Традиционная технология изготовления нежестких штоков гидроцилиндров включает черновую и чистовую лезвийную обработку, упрочняющую термическую, абразивную (шлифование и полирование), гальваническую (хромирование), абразивную (полирование) обработки, правку. Правка приводит к существенному увеличению трудоемкости изготовления штоков.

В соответствии с ГОСТ 30074-93 штоки следует изготавливать с твердостью не ниже *HRC* 46,5 с последующим антикоррозионным износостойким покрытием.

С целью уменьшения трудоемкости изготовления штоков гидроцилиндров, работающих в условиях отсутствия посторонних механических воздействий на шток в процессе эксплуатации, многие производства применяют упрочняющую обработку поверхностей жестким накатником (например, филиал ОАО «МАЗ» управляющей компании холдинга «МАЗ» – «Завод «Могилевтрансмаш»), что позволяет исключить правку. Для этих целей необходимо оснащение с жестким роликовым накатником и СОЖ. Инструмент применим только для одного диаметрального размера заготовки.

В качестве альтернативы был предложен способ изготовления нежестких штоков гидроцилиндров, который включает черновую и чистовую лезвийную обработку, импульсно-ударную пневмовибродинамическую (ИУ ПВДО), абразивную (полирование), гальваническую (хромирование) и абразивную (полирование) обработки.

Способ предусматривает использование одного накатника для значительного диапазона диаметральных размеров штоков. СОЖ не требуется.

Инструментом для осуществления поверхностного пластического деформирования служил пневматический шариковый накатник центробежного действия (см. рисунок 3.6). Характеристика рабочих тел: материал – сталь ШХ15, твердость 62...64 HRC, номинальный диаметр – 12,7 мм, шероховатость поверхности $Ra = 0,125$ мкм. Диаметр цилиндрических сопел $d_{\text{сопел}} = 3,3$ мм. Число сопел $n_{\text{сопел}} = 5$ шт. Диаметр расположения окружности центров деформирующих шаров 90 мм.

Режимы процесса обработки длинномерных штоков:

- после чистового точения при режимах $n = 80$ мин⁻¹; подача $S = 16$ мм/мин; шероховатость наружной поверхности штоков $Ra = 6,44...5,64$ мкм;
- в результате ИУ ПВДО при режимах $P_{\text{и}} = 0,2$ МПа; $n = 200$ мин⁻¹; подача $S = 40$ мм/мин обеспечивается $Ra = 2,06...1,43$ мкм;
- после полирования $Ra = 0,5...0,32$ мкм;
- после хромирования и полирования $Ra = 0,32$ мкм.

На токарных операциях и в процессе ИУ ПВДО из-за нежесткости заготовки применялся люнет. Для охлаждения и предотвращения задиров на обрабатываемой поверхности в зону контакта люнета и заготовки подавалась СОЖ (рисунок 9.9).

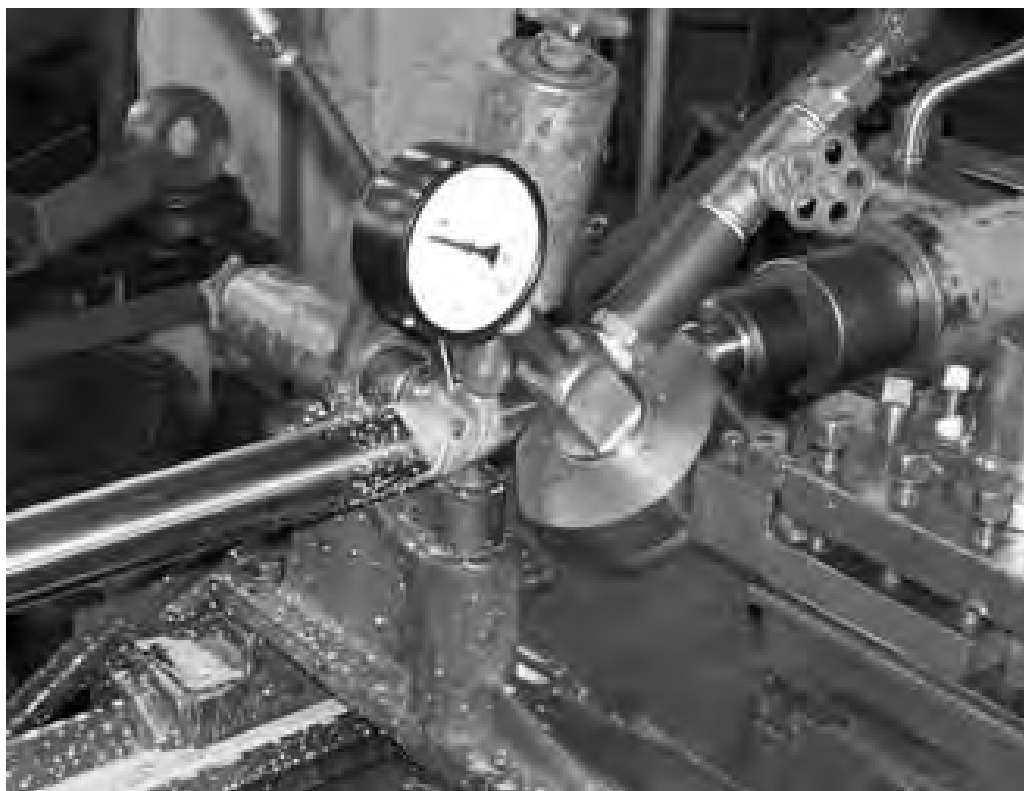


Рисунок 9.9 – Технологическая операция ИУ ПВДО штока гидроцилиндра

В результате внедрения способа упрочняющей импульсно-ударной ПВДО на промышленной партии заготовок штока получен упрочненный поверхностный слой. Партия признана годной и передана на сборку.

Новая технология изготовления длинномерных штоков гидроцилиндров предполагает исключение технологических операций и, соответственно, затрат по их стоимости.

Срок окупаемости капитальных затрат, необходимых для внедрения новой технологии, составляет 2 года и 2 месяца, экономический эффект внедрения – 52972 р. для двух штоков (в ценах 2008 г.).

9.6 Практическое использование суперфинишной пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения в производстве

Суперфинишная ПЦО применяется для обработки упрочненной поверхности стальных нетермообработанных нежестких заготовок гильз гидроцилиндров на предприятиях Беларуси и стран СНГ.

Технология рекомендована для всех типов производства на имеющемся на предприятии оборудовании, т. к. не требует специальных станков высокой точности; процесс экологически чистый, менее энергозатратный (электроэнергия только на перемещение инструмента, давление сжатого воздуха $P_{и} \leq 0,1$ МПа). Исходная шероховатость под суперфинишную ПЦО после жесткого роликового раскатывания должна находиться в пределах $Ra = 0,11...0,16$ мкм, тогда гарантировано обеспечение качества обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм. В массовом и крупносерийном производстве следует применять агрегатные станки и технологические роторные машины, легко адаптируемые к данному процессу.

Технология суперфинишной ПЦО внедрена на ОАО «Могилевский завод «Строммашина» для обработки отверстий гильз цилиндров СМ 942.10.03.181Б, входящих в состав изготавливаемых заводом гидроаккумуляторов СМ 942.10.03.130В. Режимы процесса суперфинишной ПЦО: давление сжатого воздуха, подводимого от цеховой сети к инструменту, $P_{и} = 0,08$ МПа; частота вращения заготовки $n = 125$ мин⁻¹; подача $S = 250$ мм/мин; количество ходов $i = 1$; шероховатость поверхности после обработки $Ra = 0,06...0,08$ мкм.

Экономический эффект от внедрения составил 28530972 р. (в ценах 2008 г.) при сроке окупаемости новой технологии 6 месяцев.

В настоящее время большинство заводов изготавливают гильзы из нетермообработанных заготовок, исключение составляет БЕЛАЗ, выполняющий термоулучшение перед операциями мехобработки с целью улучшения обрабатываемости и механических свойств поверхности. Применение суперфинишной ПЦО для обработки внутренних поверхностей отверстий таких гильз позволило бы отменить операцию термообработки, что дало бы возможность уменьшить энергозатраты на обработку и, соответственно, получить экономический эффект, во много раз превышающий тот, расчет которого приведен в работе.

Дальнейшее развитие способа обработки гильз гидроцилиндров на основе суперфинишной ПЦО видится в повышении производительности. Операция суперфинишной ПЦО является в технологическом процессе обработки окончательной, обеспечивающей необходимое качество поверхностного слоя за счет снижения шероховатости до $Ra = 0,06...0,08$ мкм. Суперфинишная ПЦО – это дополнительная операция техпроцесса, снижающая производительность. Проблема повышения производительности решается за счет создания инструмента, реализующего совмещенную обработку ППД и суперфинишную ПЦО. Такая конструкция комбинированного инструмента позволила бы повысить производительность по сравнению с отдельной обработкой в 2...2,5 раза, а также отказаться от операции очистки поверхности заготовок от масла между двумя отдельными операциями.

Заключение

Создана эффективная технология упрочняющей финишной ПВДО, позволяющая в отличие от традиционных способов обработки нежестких заготовок более чем на порядок снизить расход электроэнергии, повысив эксплуатационные свойства обработанных поверхностей.

Пневмоцентробежную обработку по создаваемой глубине наклепа (0,01...0,06 мм) следует отнести к процессам тонкого поверхностного деформирования. Поверхности, полученные в результате пневмоцентробежной обработки, обладают высоким уровнем свободной энергии и малыми величинами остаточных напряжений сжатия (300 МПа). Поэтому такая обработка в соответствии с законами триботехники и синергетики в области самоорганизующихся процессов является предпочтительной для рабочих поверхностей пар сухого и полусухого трения.

ПВДО сопровождается прерывистым контактом рабочих тел с поверхностью заготовки в струе сжатого воздуха, находящегося в состоянии адиабатического расширения. В результате, с одной стороны, перемещение частиц среды под давлением в сочетании с движением тел по обрабатываемой поверхности создает условия автоколебательного движения, существенно снижая силу для поверхностного деформирования и интенсифицируя процесс обработки, а с другой – исключает нагрев поверхности заготовки и рабочих тел, предопределяя использование процесса для изготовления нежестких деталей.

ПВДО целесообразно использовать при изготовлении деталей типа тел вращения, поверхностей, имеющих сложную форму (сферическую, коническую, эллиптическую, с волнистой образующей), и плоских поверхностей. При этом точность и геометрическая форма детали должны обеспечиваться на предшествующей поверхностному деформированию технологической операции. Возможна обработка заготовок из черных и цветных металлов. Максимальная твердость обрабатываемого материала – 60...65 *HRC*.

Производительность процесса обработки $S = 0,005...1$ м/мин зависит от твердости материала и исходной шероховатости поверхности. Достигаемая шероховатость поверхности – $Ra = 1...0,03$ мкм. Перед ПВДО предпочтительны тонкое растачивание и шлифование. Для материалов заготовок с твердостью $HRC \leq 65$, поверхность которых получена тонким шлифованием, обеспечивается снижение шероховатости после ПВДО на 45...50 %.

В результате ПВДО получают сухую и чистую деталь. У заготовок из хрупких материалов, например чугунов, в процессе поверхностного деформирования микронеровностей непрочная часть вершины гребешков, в

отличие от традиционных процессов накатывания поверхности, не внедряется, а дробится (скалывается) и уносится из зоны обработки, что обуславливает более высокое качество поверхности. Кроме того, раковины, имеющие подслоное, близкое к поверхности расположение и не вскрывающиеся при шлифовании, растачивании, хонинговании, а также влияющие на работоспособность пар трения, обнаруживаются после ПВДО. Заготовки с такими дефектами легко отбраковываются, повышается культура производства и улучшается качество изготовления изделий.

Импульсно-ударную обработку, при которой образуется микро-рельеф в виде лунок, целесообразно использовать для поверхностей деталей, когда требуется создание гидроплотных соединений для устранения утечки рабочей среды. Технические требования чертежа по неплоскостности не жестких деталей можно снизить без ущерба для гидроплотности стыкового соединения. Возможна обработка поверхности наружных, внутренних поверхностей вращения и плоских поверхностей, Т-образных пазов, деталей из черных и цветных металлов ($Ra = 0,5...2,5$ мкм, $S = 40...900$ мм/мин).

ПВДО способствует старению заготовки аналогично применяемым устройствам для вибростарения, что предполагает возможность ее использования на операциях перед тонкой лезвийной или абразивной обработкой для снятия у заготовок внутренних напряжений с целью повышения качества изделий.

Уменьшение износа гильз ДВС составит больше 40 % при использовании процесса пневмоцентробежной обработки и последующего латунирования, что позволит повысить КПД двигателя, исключит многостадийность хонинговальных операций.

Установлено, что процесс пневмовибродинамической абразивной обработки можно применять для полирования, тонкого абразивного шлифования заготовок. Качество поверхности при этом зависит от физико-механических характеристик рабочих тел, исходной твердости материала и шероховатости поверхности заготовки. Возможно создание на этой основе принципиально новых и простых станков для тонкой абразивной обработки.

Разработан способ образования регулируемого микро-рельефа и созданы инструменты, позволяющие получать рабочие поверхности как с изотропными, так и с анизотропными свойствами.

Совершенствование процессов пневмовибродинамической и абразивной обработки связано с углубленным исследованием и изучением процессов, происходящих в расширительной камере корпуса инструмента, и

характера взаимодействия рабочих тел со средой под давлением и обрабатываемой поверхностью.

Созданные, разработанные и исследованные новые технологические процессы изготовления нежестких деталей будут способствовать дальнейшему развитию научных и прикладных основ технологии машиностроения.

Список литературы

1 Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 944 с.

2 **Исупов, М. Г.** Шероховатость поверхности, получаемая струйно-ударной обработкой / М. Г. Исупов // Вестн. машиностроения. – 1999. – № 11. – С. 50–52.

3 **Исупов, М. Г.** Повышение эксплуатационных свойств прецизионных пар трения струйно-абразивной обработкой / М. Г. Исупов, Л. Т. Крекнин // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 7. – С. 68–69.

4 **Пат. № 2090342 РФ, МКИ³ В 24 В 39/04.** Гидроударное устройство для обработки деталей поверхностным пластическим деформированием / А. Г. Лазуткин, А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев. – № 95122309/02 ; заявл. 21.12.95 ; опубл. 20.09.97, Бюл. № 26. – 2 с.

5 **Пат. № 2098259 РФ, МКИ³ В 24 В 39/00.** Способ статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. Г. Лазуткин, А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев. – № 96110476/02 ; заявл. 23.05.96 ; опубл. 10.12.97, Бюл. № 34. – 2 с.

6 Упрочнение ответственных поверхностей статико-импульсной обработкой / О. М. Щебров [и др.] // Наука производству. – 1998. – № 11. – С. 20–23.

7 **Соловьев, Д. Л.** Условия реализации СИО ППД для упрочнения плоских поверхностей деталей машин / Д. Л. Соловьев, А. Г. Лазуткин, С. А. Силантьев // Конструкторско-технологическая информатика–2000 : сб. тр. IV Междунар. конгресса «Станкин». – М., 2000. – Т. 2. – С. 149–150.

8 **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

9 **Петросов, В. В.** Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В. В. Петросов. – М. : Машиностроение, 1977. – 165 с.

10 **Проволоцкий, А. Е.** Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. – Киев : Техника, 1989. – 276 с.

11 **Билик, Ш. М.** Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш. М. Билик. – М. : Машиностроение, 1960. – 150 с.

12 **Минаков, А. П.** Современное состояние и перспективы развития процессов пневмовибродинамической отделочно-упрочняющей обработки нежестких деталей / А. П. Минаков // Нестандартное оборудование, оснастка, механизация и прогрессивная технология машиностроительного производства : тез. докл. науч.-техн. конф. – Владимир, 1989. – С. 20–21.

13 **Благовещенский, В. И.** Поверхностная деформационная обработка валов ГТД / В. И. Благовещенский, В. Ф. Притченко // Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Брянск, 1986. – С. 119.

14 **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 304 с.

15 **Лурье, Г. Б.** Упрочняюще-отделочная обработка рабочих поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Технология обработки давлением / Г. Б. Лурье, Я. И. Штейнберг. – М. : НИИМАШ, 1971. – 156 с.

16 **Феликсон, Е. И.** Пневматические шлифованные вибродвигатели / Е. И. Феликсон // Вестн. машиностроения. – 1962. – № 5. – С. 31.

17 **Ящерицын, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск : Наука и техника, 1986. – 215 с.

18 Отделочные операции в машиностроении : справочник / Под общ. ред. П. А. Руденко. – Киев : Техника, 1985. – 136 с.

19 **Филонов, И. П.** Механика процессов обкатки / И. П. Филонов; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Навука і тэхніка, 1985. – 326 с.

20 **Мамелова, Е. Г.** Влияние дробеструйной и гидродробеструйной обработки на прочность стали 18Х2Н4ВА / Е. Г. Мамелова, Б. И. Александров, В. В. Петросов // Размерно-чистовая и упрочняющая обработка поверхностным деформированием : сб. докл. семинара. – М. : НИИМАШ, 1968. – С. 164–171.

21 **Гольдсмит, В.** Удар (теория и физические свойства соударяемых тел) : пер. с англ. / В. Гольдсмит. – М. : Стройиздат, 1965. – 448 с.

22 **Саверин, М. М.** Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М. : Машгиз, 1955. – 312 с.

23 Гидропластическая обработка металлов : пер. с болгар. / К. Н. Богоявленский [и др.] ; под общ. ред. К. Н. Богоявленского, А. Г. Рябина. – Л. : Машиностроение ; София : Техника, 1988. – 256 с.

24 Импульсные методы обработки материалов / Под ред. В. Н. Чачина. – Минск : Наука и техника, 1979. – 168 с.

25 **А. с. 202751 СССР, МКИ¹ В 24.** Способ обработки деталей / Г. Ш. Бернштейн, Ю. А. Гаусман, Л. Ф. Дрибин (СССР). – № 1094873/25 ; заявл. 29.07.66 ; опубл. 14.09.67, Бюл. № 19. – 2 с.

26 Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 135 с.

27 Справочник конструктора машиностроителя : в 3 т. / Под ред. М. Н. Жестковой. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 928 с.

28 **Богдан, Н. В.** Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Пневматические и гидравлические системы : учеб. пособие / Н. В. Богдан. – Минск : Ураджай, 2002. – 426 с.

29 Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

30 Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева [и др.] ; под общ. ред. Т. М. Башты. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.

31 Трибология: исследования и приложения (опыт США и стран СНГ) / Под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. – М. : Машиностроение ; Нью-Йорк : Аллертон пресс, 1993. – 454 с.

32 **Юценко, С. А.** Триботехнология формирования поверхностей / С. А. Юценко, А. В. Бараболя. – Киев : Навукова думка, 1989. – 312 с.

33 **Крагельский, И. В.** Развитие науки о трении / И. В. Крагельский, В. С. Щедров. – М. : АН СССР, 1956. – 256 с.

34 Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 2. – 412 с.

35 **Шнейдер, Ю. Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248 с.

36 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.

37 **Пат. 2009862 РФ, МКИ³ В 24 В 39/02, В 24 В 39/00.** Способ обработки поверхностным пластическим деформированием внутренних цилиндрических поверхностей и инструмент для его осуществления / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, С. В. Крамаренко, Н. С. Гарлачов, О. В. Ящук. – № 4825833/27 ; заявл. 18.05.90 ; опубл. 30.03.94, Бюл. № 6. – 7 с.

38 **Пат. 1598375 РФ, МКИ³ В 24 В 39/00.** Способ комбинированной окончательной обработки внутренних поверхностей нежестких деталей / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, А. А. Бунос, А. Н. Рязанцев, О. В. Ящук. – № 4632838/31 ; заявл. 23.11.88 ; опубл. 23.07.92, Бюл. № 23. – 5 с.

39 **Прейс, В. В.** Технологические роторные машины: вчера, сегодня, завтра / В. В. Прейс. – М. : Машиностроение, 1986. – 128 с.

40 **Кошкин, Л. Н.** Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин. – М. : Машиностроение, 1986. – 320 с.

41 Автоматические роторные линии / И. А. Клусов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.

42 **Недужий, И. А.** Техническая термодинамика и теплопередача / И. А. Недужий, А. Н. Алабовский. – Киев : Вища шк., 1987. – 224 с.

43 **Альтшуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.

44 **Абрамович, Г. Н.** Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – М. : Физматгиз, 1960. – 715 с.

45 Улучшение качества внутренних поверхностей деталей машин пневмодинамическим раскатыванием / П. И. Ящерицын [и др.] // Жесткость машиностроительных конструкций. Технологическое обеспечение требуемой микрогеометрии и жесткости поверхностных слоев : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Брянск, 1976. – С. 63–64.

46 **Кремень, З. И.** Прогрессивная технология хонингования и суперфиниширования / З. И. Кремень. – М. : Машиностроение, 1978. – 52 с.

47 **Марутов, В. А.** Гидроцилиндры. Конструкции и расчет / В. А. Марутов, С. А. Павловский. – М. : Машиностроение, 1966. – 171 с.

48 **Ящерицын, П. И.** Пневмоцентробежный способ упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения / П. И. Ящерицын, И. П. Филонов, А. П. Минаков // Вестн. машиностроения. – 1977. – № 4. – С. 48–50.

49 **Кабаков, М. Г.** Технология производства гидроприводов / М. Г. Кабаков, С. П. Стесин. – М. : Машиностроение, 1974. – 192 с.

50 **Ящерицын, П. И.** Пневмоцентробежная обработка нежестких деталей поверхностным пластическим деформированием / П. И. Ящерицын, И. П. Филонов, А. П. Минаков // Докл. АН БССР. – 1977. – Т. XXI, № 11. – С. 1004–1007.

51 **Орлов, П. Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П. Н. Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 384 с.

52 **Ящерицын, П. И.** Чистовая обработка деталей в машиностроении : учеб. пособие / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск : Выш. шк., 1983. – 191 с.

53 **Динник, А. Н.** Избранные труды / А. Н. Динник. – Киев : АН УССР, 1952. – 174 с.

54 **Ящерицын, П. И.** Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. – Минск : Выш. шк., 1974. – 608 с.

55 Пат. 482 РБ, МКИ³ В 24 В 39/06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая. – № u20010213 ; заявл. 16.08.01 ; опубл. 30.03.02, Бюл. № 1. – 2 с.

56 Пат. 1373 РБ, МКИ³ В 24 В 39/06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая. – № u20030412 ; заявл. 23.09.03 ; опубл. 30.06.04, Бюл. № 2. – 3 с.

57 Пат. 12473 РБ, МКИ³ В 24 В 39/06. Способ обработки поверхностным пластическим деформированием плоской поверхности и инструмент для его осуществления / А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев, И. Д. Камчицкая. – № a20060866 ; заявл. 29.08.06; опубл. 30.10.09, Бюл. № 4. – 4 с.

58 Теоретические исследования по оптимизации конструктивных параметров пневмонакатника импульсно-ударного действия для обработки плоских поверхностей / Г. А. Колосов [и др.] // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 101–105.

59 Пат. 4596 РБ, МКИ³ В 24 В 39/06. Инструмент для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей / А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев, И. Д. Камчицкая. – № u20080006 ; заявл. 08.01.08 ; опубл. 15.05.08, Бюл. № 2. – 3 с.

60 Воронков, И. М. Курс теоретической механики / И. М. Воронков. – М. : Наука, 1966. – 596 с.

61 Котляр, И. В. Особенности выбора параметров трубопровода пневмомашин, обусловленные гидравлическими характеристиками подводящей системы / И. В. Котляр, Ю. П. Кузнецов, С. А. Гусаров // Вестн. машиностроения. – 1987. – № 1. – С. 31–32.

62 Камчицкая, И. Д. Упрочняющая технология восстановления направляющих станин станков на основе лезвийной и пневмовибродинамической обработки : дис. ... канд. техн. наук : защищена 22.12.06 : утв. 28.02.07 / И. Д. Камчицкая. – Могилев, 2006. – 129 с.

63 Ящук, О. В. Методика определения скорости деформирующих элементов на стадии проектирования инструмента для финишной пневмовибродинамической обработки (ПВДО) / О. В. Ящук // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 4. – С. 44–49.

64 Бунос, А. А. Исследование влияния аэродинамических характеристик на качество поверхности при пневмовибродинамической обработке / А. А. Бунос, А. П. Минаков. – М., 1993. – 7 с. – Деп. во ВНИИТЭМР, № 85.

65 Бунос, А. А. Повышение качества и производительности отделочной обработки нежестких деталей высокой твердости : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. А. Бунос. – Могилев, 1996. – 133 с.

66 **Бунос, А. А.** Исследование влияния отдельных конструктивных параметров инструмента на параметры шероховатости поверхности пневмоцентробежной обработки / А. А. Бунос, А. П. Минаков // Ученые и специалисты – народному хозяйству области : тез. докл. обл. науч.-техн. конф. – Могилев, 1993. – С. 19.

67 **Спиридонов, С. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / С. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

68 **Колкер, Я. Д.** Математический анализ точности механической обработки деталей / Я. Д. Колкер. – Киев : Техника, 1976. – 200 с.

69 **РТМ 37.002.0024-74.** Технология поверхностного пластического деформирования автомобильных деталей. – М. : НИИТавтопром, 1971. – 94 с.

70 **Лебедев, В. А.** Технологическое обеспечение качества поверхности деталей при вибрационно-ударной обработке : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. А. Лебедев. – Ростов н/Д, 1984. – 234 с.

71 **Анкудимов, Ю. П.** Разработка комбинированного процесса вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей (в интервале температур 20...350 °С) : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю. П. Анкудимов. – Ростов н/Д, 1983. – 183 с.

72 **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

73 **Балашов, Е. П.** Статистический контроль и регулирование качества массовой продукции / Е. П. Балашов, В. А. Долженков. – М. : Машиностроение, 1984. – 231 с.

74 **Кане, М. М.** Основы научных исследований в технологии машиностроения : учеб. пособие для вузов / М. М. Кане. – Минск : Выш. шк., 1987. – 231 с.

75 **Антонова, Е. Н.** Прогнозирование и технологическое обеспечение шероховатости и формы микрорельефа поверхности при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Е. Н. Антонова. – Могилев, 2007. – 155 с.

76 **А. с. 1761452 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков, Н. С. Гарлачов, О. В. Ящук, Е. Н. Горлачева, В. В. Нетесин (СССР). – № 4754020/27 ; заявл. 30.10.89 ; опубл. 15.09.92, Бюл. № 34. – 5 с.

77 **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.

78 **Попов, Д. Н.** Механика гидро- и пневмоприводов : учебник для вузов / Д. Н. Попов. – 2-е изд., стереотип. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 320 с.

79 **Грановский, Г. И.** Кинематика резания / Г. И. Грановский. – М. : Машгиз, 1948. – 200 с.

80 **Коновалов, Е. Г.** Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск : АН БССР, 1961. – 297 с.

81 **Вульф, А. М.** Резание металлов / А. М. Вульф. – Л. : Машиностроение, 1973. – 496 с.

82 **Аркадьев, В. К.** Избранные труды / В. К. Аркадьев. – М. : АН СССР, 1961. – 331 с.

83 **Кумабе, Д.** Вибрационное резание : пер. с яп. / Д. Кумабе ; под ред. Н. И. Портнова, В. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.

84 **Сакулевич, Ф. Ю.** Основы магнитоабразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.

85 **А. с. 861039 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин, В. А. Морозов, А. А. Кошелев (СССР). – № 2821556/25 ; заявл. 26.09.79 ; опубл. 07.09.81, Бюл. № 33. – 6 с.

86 **А. с. 908578 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, А. П. Минаков, Я. М. Сургунт (СССР). – № 2943000/25 ; заявл. 17.06.80 ; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8. – 2 с.

87 **А. с. 527858 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант. – № 1996396/08 ; заявл. 04.01.74 ; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8. – 2 с.

88 **А. с. 1074702 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, Я. М. Сургунт, В. Н. Леушкин (СССР). – № 3439364/26 ; заявл. 18.05.82 ; опубл. 23.02.84, Бюл. № 7. – 3 с.

89 **А. с. 1699760 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для обработки поверхностным пластическим деформированием / Э. А. Сви-дерский, А. П. Минаков (СССР). – № 4396496/63 ; заявл. 22.03.88 ; опубл. 23.12.91, Бюл. № 47. – 2 с.

90 **А. с. 730551 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант, Г. М. Миронов (СССР). – № 1881027/25 ; заявл. 12.02.73 ; опубл. 30.04.80, Бюл. № 16. – 2 с.

91 **Минаков, А. П.** Исследование кинетостатических параметров при пневмоцентробежной обработке плоских и наружных поверхностей вращения / А. П. Минаков, Н. А. Леванович. – М., 1992. – 18 с. – Деп. во ВНИИТЭМР, № 83.

92 **А. с. 1027019 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Устройство для чистовой и упрочняющей обработки плоских поверхностей / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 3411836/25 ; заявл. 16.03.82 ; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25. – 3 с.

93 **А. с. 837810 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, В. Н. Леушкин (СССР). – № 2824278/25 ; заявл. 02.10.79 ; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22. – 3 с.

94 **А. с. 1567361 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04, 39/02.** Инструмент импульсно-ударной обработки поверхностей деталей / Э. А. Свидерский, О. В. Ящук (СССР). – № 4433324/25 ; заявл. 28.04.88 ; опубл. 30.05.90, Бюл. № 20. – 4 с.

95 Краткий справочник металлиста / Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – М. : Машиностроение, 1987. – 960 с.

96 **А. с. 512043 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, Г. М. Миронов, Ю. К. Голант (СССР). – № 1841691/25 ; заявл. 30.10.72 ; опубл. 30.04.76, Бюл. № 16. – 2 с.

97 **А. с. 543505 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 1882419/08 ; заявл. 12.02.73 ; опубл. 25.01.77, Бюл. № 3. – 4 с.

98 **А. с. 559814 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, А. П. Минаков (СССР). – № 1882420/08 ; заявл. 12.02.73 ; опубл. 30.05.77, Бюл. № 20. – 2 с.

99 **А. с. 543506 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, А. П. Минаков (СССР). – № 18824219/08 ; заявл. 22.05.73 ; опубл. 25.01.77, Бюл. № 3. – 4 с.

100 А. с. **623726 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. Н. Леушкин, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 2446094/25 ; заявл. 24.01.77 ; опубл. 15.09.78, Бюл. № 34. – 2 с.

101 А. с. **781033 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 2685702/25 ; заявл. 14.11.78 ; опубл. 23.11.80, Бюл. № 43. – 4 с.

102 А. с. **841939 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин, В. А. Морозов, А. А. Кошелев (СССР). – № 2804217/25 ; заявл. 02.08.79 ; опубл. 30.06.81, Бюл. № 24. – 4 с.

103 А. с. **841940 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин, В. А. Морозов, А. А. Кошелев (СССР). – № 2810180/25 ; заявл. 16.08.79 ; опубл. 30.06.81, Бюл. № 24. – 4 с.

104 А. с. **897487 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин, В. А. Морозов, А. А. Кошелев (СССР). – № 2915141/25 ; заявл. 24.04.80 ; опубл. 15.01.82, Бюл. № 2. – 4 с.

105 А. с. **664826 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант (СССР). – № 1864755/25 ; заявл. 02.01.73 ; опубл. 30.05.79, Бюл. № 20. – 2 с.

106 А. с. **919855 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин (СССР). – № 2926040/25 ; заявл. 20.05.80 ; опубл. 15.04.82, Бюл. № 14. – 6 с.

107 А. с. **921813 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин (СССР). – № 2926036/25 ; заявл. 20.05.80 ; опубл. 23.04.82, Бюл. № 15. – 4 с.

108 А. с. **844252 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. А. Заикин, В. А. Морозов, А. А. Кошелев (СССР). – № 2806742/25 ; заявл. 08.08.79 ; опубл. 07.07.81, Бюл. № 25. – 2 с.

109 А. с. **905024 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации /

Л. М. Натапов (СССР). – № 2927677/25 ; заявл. 21.05.80 ; опубл. 15.02.82, Бюл. № 6. – 2 с.

110 А. с. **1038202 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / Э. Я. Ивашин, В. А. Карпушин, Р. Б. Миткин (СССР). – № 3416565/25 ; заявл. 07.04.82 ; опубл. 30.08.83, Бюл. № 32. – 3 с.

111 А. с. **1074703 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков, Ю. К. Голант, Е. Н. Блинов (СССР). – № 3534168/25 ; заявл. 10.01.83 ; опубл. 23.02.84, Бюл. № 7. – 3 с.

112 А. с. **1454668 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков, Э. А. Свицерский (СССР). – № 4259556/25 ; заявл. 10.06.87 ; не публикуется.

113 А. с. **1488182 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для обработки цилиндрических отверстий методом пластической деформации / А. П. Минаков, Н. С. Гарлачов (СССР). – № 4207823/31 ; заявл. 10.03.87 ; опубл. 23.06.89, Бюл. № 23. – 2 с.

114 А. с. **948641 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой и упрочняющей обработки отверстий деталей / В. А. Заикин (СССР). – № 3242644/25 ; заявл. 03.02.81 ; опубл. 07.08.82, Бюл. № 29. – 3 с.

115 А. с. **901036 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / И. П. Филонов, П. И. Киреев, А. А. Иванчиков (СССР). – № 2941525/25 ; заявл. 16.06.80 ; опубл. 30.01.82, Бюл. № 4. – 3 с.

116 А. с. **1333555 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / В. Б. Грачев (СССР). – № 3998431/25 ; заявл. 02.01.86 ; опубл. 30.08.87, Бюл. № 32. – 4 с.

117 А. с. **1047668 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 3428485/25 ; заявл. 26.04.82 ; опубл. 15.10.83, Бюл. № 38. – 2 с.

118 А. с. **1030148 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 3428485/25 ; заявл. 24.04.78 ; опубл. 23.07.83, Бюл. № 27. – 3 с.

119 А. с. **1206070 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации /

П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант, В. А. Лавров, В. Н. Леушкин, Е. Н. Блинов (СССР). – № 3771393/25 ; заявл. 12.07.84 ; опубл. 23.01.86, Бюл. № 3. – 4 с.

120 А. с. **1323352 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняюще-чистой обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. Л. Абугов, А. И. Нестер (СССР). – № 4007913/25 ; заявл. 15.01.86 ; опубл. 15.07.87, Бюл. № 26. – 4 с.

121 А. с. **1470494 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, Н. С. Гарлачов (СССР). – № 4118483/31 ; заявл. 05.06.86 ; опубл. 07.04.89, Бюл. № 13. – 3 с.

122 А. с. **931425 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистой обработки тел вращения методом пластической деформации / И. П. Филонов, П. И. Киреев, А. А. Иванчиков (СССР). – № 3004732/25 ; заявл. 17.11.80 ; опубл. 30.05.82, Бюл. № 20. – 3 с.

123 А. с. **1632753 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков, А. А. Гудзь, В. И. Романчук (СССР). – № 4680175/27 ; заявл. 18.04.89 ; опубл. 07.03.91, Бюл. № 9. – 3 с.

124 А. с. **959992 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистой и упрочняющей обработки отверстий деталей / В. А. Заикин (СССР). – № 3242632/25 ; заявл. 03.02.81 ; опубл. 23.09.82, Бюл. № 35. – 4 с.

125 А. с. **662219 СССР, МКИ² В 21 Н 3/08, В 24 В 39/02.** Устройство для упрочняющей обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, И. П. Филонов, А. Д. Маляренко, А. П. Минаков (СССР). – № 2451268/25 ; заявл. 07.02.77 ; опубл. 15.05.79, Бюл. № 18. – 3 с.

126 Пат. **962408 ФРГ, МКИ В 21 J 7/16.** Инструмент для чистой обработки / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, Г. М. Миронов, Ю. К. Голант, В. В. Богачев, Е. Н. Блинов, С. В. Соколовский (СССР). – № 1841691/25 ; заявл. 13.05.75 ; опубл. 27.03.80. – 8 с.

127 А. с. **543507 СССР, МКИ² В 24 В 39/02.** Инструмент для чистой обработки тел вращения методом пластической деформации / А. П. Минаков, П. И. Ящерицын, Г. М. Миронов, Е. Н. Блинов, Ю. К. Голант (СССР). – № 2064215/08 ; заявл. 03.10.74 ; опубл. 25.01.77, Бюл. № 3. – 4 с.

128 **Проников, А. С.** Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 591 с.

129 Технология машиностроения (специальная часть) : учебник / А. А. Гусев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.

130 Рудзит, Я. А. Исследование нерегулярной шероховатости и процесс контактного взаимодействия поверхностей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.01; 05.11.15 / Я. А. Рудзит. – Рига, 1981. – 316 с.

131 А. с. **543504 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 1881669/08 ; заявл. 12.02.73 ; опубл. 25.01.77, Бюл. № 3. – 4 с.

132 А. с. **1038203 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 3428484/27 ; заявл. 26.04.82 ; опубл. 30.08.83, Бюл. № 32. – 3 с.

133 А. с. **1143580 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом ППД / А. П. Минаков, Ю. К. Голант, Г. М. Миронов (СССР). – № 3634884/25 ; заявл. 16.08.85 ; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9. – 3 с.

134 А. с. **747598 СССР, МКИ² В 21 Н 3/00, В 24 В 39/02**. Инструмент импульсно-ударного действия для чистовой обработки тел вращения / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 2563188/25 ; заявл. 05.01.78 ; опубл. 15.07.80, Бюл. № 26. – 4 с.

135 А. с. **1404301 СССР, МКИ³ В 24 В 39/00**. Многошариковый пневматический раскатник импульсного действия / А. А. Важенин, Е. Н. Москалев, В. Н. Латышев, С. В. Жданов (СССР). – № 4067543/25 ; заявл. 19.02.86 ; опубл. 23.06.86, Бюл. № 23. – 5 с.

136 А. с. **903093 СССР, МКИ³ В 24 В 39/02**. Инструмент для упрочняющей обработки отверстий / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Е. Н. Блинов (СССР). – № 2793507/25 ; заявл. 07.06.79 ; опубл. 07.02.82, Бюл. № 5. – 4 с.

137 А. с. **730551 СССР, МКИ² В 24 В 39/02**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 1881027/25 ; заявл. 12.02.73 ; опубл. 30.04.80, Бюл. № 16. – 2 с.

138 А. с. **1171301 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04**. Устройство для наклепа деталей / В. А. Карпушин, В. Н. Мишута, В. П. Петрашкевич (СССР). – № 3707457/25 ; заявл. 06.03.84 ; опубл. 07.08.85, Бюл. № 29. – 3 с.

139 А. с. **667390 СССР, МКИ² В 24 В 39/04**. Инструмент для чистовой обработки тел вращения методом пластической деформации /

П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 2563187/25 ; заявл. 05.01.78 ; опубл. 15.06.79, Бюл. № 22. – 2 с.

140 А. с. **694355 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04.** Устройство для чистовой и упрочняющей обработки плоских поверхностей / Н. Н. Рябов (СССР). – № 1824954/25 ; заявл. 28.08.72 ; опубл. 30.10.79, Бюл. № 40. – 2 с.

141 А. с. **908579 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04.** Устройство для чистовой и упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. В. Леонов, Н. Н. Петров, А. А. Литвинов (СССР). – № 2938458/25 ; заявл. 10.06.80 ; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8. – 2 с.

142 А. с. **1027019 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04.** Устройство для чистовой и упрочняющей обработки плоских поверхностей / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, Ю. К. Голант (СССР). – № 3411836/25 ; заявл. 16.03.82 ; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25. – 3 с.

143 А. с. **933415 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04.** Устройство для обработки плоских поверхностей / И. П. Филонов, Э. Я. Ивашин, П. Н. Киреев, И. А. Косырев (СССР). – № 2941493/25 ; заявл. 16.06.80 ; опубл. 07.06.82, Бюл. № 21. – 3 с.

144 А. с. **751603 СССР, МКИ³ В 24 В 39/04.** Комбинированный инструмент для обработки плоских поверхностей / П. И. Ящерицын, П. С. Чистосердов, В. Г. Беляй (СССР). – № 2682765/25 ; заявл. 10.11.78 ; опубл. 30.07.80, Бюл. № 28. – 3 с.

145 **Налимов, В. В.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 282 с.

146 **Грановский, Ю. В.** Основы планирования экстремального эксперимента для оптимизации многофакторных технологических процессов / Ю. В. Грановский. – М. : МИНХ, 1971. – 72 с.

147 **Минаков, А. П.** Исследование конструктивных параметров инструмента и качества поверхности пневмоцентробежной обработки / А. П. Минаков. – Могилев, 1995. – 10 с. – Деп. в БЕЛИНФОРМПРОГНОЗ, 17.07.95, № Д199541.

148 **Малышева, Г. В.** Герметизирующие свойства жидких прокладок на основе одноупаковочных кремнийорганических герметиков / Г. В. Малышева // Вестн. машиностроения. – 1990. – № 1. – С. 31–32.

149 **DIN 4776.** Rauheitsmessung; Kenngrößen R_k , R_{pk} , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} , zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil; Meßbedingungen und Auswerteverfahren. – Berlin : Alleinverkauf der NormenVerlag, 1990. – 30 с.

150 Аналитический обзор методик определения маслосъемности поверхности зеркала гильзы двигателя внутреннего сгорания / А. П. Минаков [и др.] // Вестн. машиностроения. – 1999. – № 10. – С. 14–16.

151 **Караваяев, М. Г.** Автоматизированный трибометр с возвратно-поступательным движением / М. Г. Караваяев, В. А. Кукареко // Надежность машин и технических систем : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : ИНДМАШ НАН Беларуси, 2001. – Т. 1. – С. 37–39.

152 **Проников, А. С.** Расчет и конструирование металлорежущих станков / А. С. Проников. – М. : Высш. шк., 1968. – 431 с.

153 **Пат. 2630 РБ, МКИ³ В 24 В 39/04.** Инструмент для пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения / А. П. Минаков, О. В. Ящук, В. И. Дьяченко, А. А. Баркун, Д. Л. Зайцев. – № u20050492 ; заявл. 15.08.05 ; опубл. 30.04.06, Бюл. № 2. – 3 с.

154 **Березин, М. А.** Прогнозирование ресурса уплотнительных соединений в гидросистемах / М. А. Березин, В. В. Кузнецов, В. Н. Водяков // Тракторы и сельско-хозяйственные машины. – 2006. – № 10. – С. 36–41.

155 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность) : учебник / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

156 **Мышкин, Н. К.** Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Гомель : ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.

157 **Минаков, А. П.** Исследование кинетостатических параметров при пневмовибродинамической обработке плоских и наружных поверхностей вращения / А. П. Минаков, Н. А. Леванович. – Могилев : ММИ, 1992. – 26 с.

158 **Гасанов, Ю. Н.** Износ поверхностей деталей, обработанных при различных сочетаниях технологических операций / Ю. Н. Гасанов // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 4. – С. 50–52.

159 **РДМУ 109-77.** Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 62 с.

160 **Пат. 2177 РБ, МКИ³ В 24 С 1/10.** Устройство для обработки валов пластическим деформированием / М. Ф. Пашкевич, А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев. – № u20050068 ; заявл. 14.02.05 ; опубл. 30.09.05, Бюл. № 3. – 2 с.

161 **Лоповок, Т. С.** Волнистость поверхности и ее измерение / Т. С. Лоповок. – М. : Машиностроение, 1973. – 184 с.

162 **Витенберг, Ю. Р.** Корреляционные характеристики шероховатости поверхности и их зависимость от технологических факторов / Ю. Р. Витенберг // Вестн. машиностроения. – 1970. – № 2. – С. 57–59.

163 **Ящерицын, П. И.** Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Выш. шк., 1977. – 254 с.

164 **Старосельский, А. А.** Долговечность трущихся деталей машин / А. А. Старосельский, Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1967. – 394 с.

165 **Хаюсен, Г.** Синергетика : пер. с нем. / Г. Хаюсен. – М. : Мир, 1980. – 440 с.

166 **Эбелин, В.** Образование структур при неравновесных процессах : пер. с нем. / В. Эбелин. – М. : Наука, 1969. – 270 с.

167 **Минаков, А. П.** Пневматические шариковые раскатники центробежного действия / А. П. Минаков // Автомобильная промышленность. – 1983. – № 11. – С. 21–23.

168 **Чеповецкий, И. Х.** Определение величины приработочного износа и маслостойкости поверхности после плосковершинного хонингования / И. Х. Чеповецкий, В. Л. Стрижаков, А. В. Бараболя // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 3. – С. 42–44.

169 **Иванова, В. С.** Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М. : Metallургия, 1975. – 455 с.

170 **Булатов, В. П.** Рекомендованный шаг шероховатости деталей ЦПГ для сохранения гарантированных условий смазки / В. П. Булатов, Е. Х. Кадышевич, В. П. Пугачев // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 43–44.

171 **Григорьев, М. А.** Износ и долговечность автомобильных двигателей / М. А. Григорьев, Н. Н. Пономарев. – М. : Машиностроение, 1976. – 186 с.

172 **Заренбин, В. Г.** Исследование режимов приработки автомобильных двигателей при капитальном ремонте / В. Г. Заренбин, А. Х. Касумов. – М. : Транспорт, 1983. – 78 с.

173 **Баходур, С.** Экономическое значение износа материалов в современном обществе / С. Баходур // Проблемы трения и смазки. – 1978. – № 2. – С. 1–4.

174 **Пикман, А. Р.** Расчет на ЭЦВМ толщины масляной пленки между поршневым кольцом и цилиндром / А. Р. Пикман, Л. М. Бурштейн // Автомобильная промышленность. – 1976. – № 12. – С. 6–8.

175 **Кольченко, В. И.** Гидродинамическое исследование толщины масляной пленки в сопряжении кольцо–цилиндр поршневых двигателей / В. И. Кольченко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 9. – С. 74–78.

176 **Ван, Фу-Жэнь.** Определение предельно допустимых износов основных деталей тракторных двигателей методом ускоренных испытаний / Фу-Жэнь Ван. – М. : Машиностроение, 1963. – 146 с.

177 **Подзей, А. В.** Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей. – М. : Машиностроение, 1968. – 132 с.

178 **Степнов, М. Н.** Эффективность упрочнения легких сплавов поверхностным наклепом / М. Н. Степнов // Машиностроение. – 1978. – № 3. – С. 77–83.

179 **Калодин, Б. А.** Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием / Б. А. Калодин, П. А. Чепан. – Минск : Наука и техника, 1974. – 232 с.

180 **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

181 **Лозовский, В. Н.** Надежность гидравлических агрегатов / В. Н. Лозовский. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.

182 **Кондрашов, Ю. И.** Конструкция и проектирование агрегатов и систем [Электронный ресурс]. – Самара, 2015. – Режим доступа : http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob. – Дата доступа : 10.12.15.

183 Трение, изнашивание и смазка : справочник в 2 кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Аликина. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 2. – 400 с.

184 **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Гостехтеориздат, 1953. – 853 с.

185 **Тимошенко, С. П.** Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1965. – Т. 2. – 480 с.

186 **Подпоркин, В. Г.** Обработка нежестких деталей / В. Г. Подпоркин. – М. : Машгиз, 1959. – 210 с.

187 **Куклев, Л. С.** Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности / Л. С. Куклев, М. М. Тазетдинов. – М. : Машиностроение, 1978. – 104 с.

188 **Сатель, Э. А.** Проблемы развития технологии машиностроения / Э. А. Сатель, В. В. Фролов, Д. А. Прокошин. – М. : Машиностроение, 1968. – 592 с.

189 **Кузовлев, В. А.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи : учебник / В. А. Кузовлев. – М. : Высш. шк., 1975. – 303 с.

190 **Бальян, С. В.** Техническая термодинамика и тепловые двигатели : учеб. пособие / С. В. Бальян. – Л. : Машиностроение, 1973. – 304 с.

191 **Горлин, С. М.** Экспериментальная аэромеханика : учеб. пособие / С. М. Горлин. – М. : Высш. шк., 1970. – 423 с.

192 **Пирумов, У. Г.** Течение газа в соплах / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – М. : МГУ, 1978. – 129 с.

193 **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.

194 Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики : учеб. пособие / Н. Г. Лашутина [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1988. – 336 с.

195 **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01, 05.02.08 / А. П. Минаков. – Могилев, 1996. – 416 с.

196 **Минаков, А. П.** Пневмовибродинамическая обработка – предпочтительный метод изготовления поверхностей пар трения и сопрягаемых поверхностей в неподвижных соединениях / А. П. Минаков, В. Н. Соколов, Н. С. Гарлачов // Вестн. машиностроения. – 2002. – № 8. – С. 39–44.

197 **Ильюшина, Е. В.** Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Е. В. Ильюшина. – Могилев, 2009. – 157 с.

198 Основы хонингования от DELAPENA [Электронный ресурс]. – М., 2008. – Режим доступа : http://www.ab-engine.ru/delapena_basic.html. – Дата доступа : 10.07.08.

199 **ГОСТ 18509-88.** Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 128 с.

200 **Кравчук, В. С.** Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно упрочненных деталей машин и элементов конструкций / В. С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А. В. Кравчук. – Одесса : Астропринт, 2000. – 160 с.

201 **ГОСТ 20000-88.** Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 15 с.

202 **Шпеньков, Г. П.** Физикохимия трения / Г. П. Шпеньков. – Минск : Университетское, 1991. – 397 с.

203 **Погодаев, Л. И.** Анализ надежности деталей цилиндропоршневой группы двигателей при трении скольжения / Л. И. Погодаев, С. Г. Чулкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 3. – С. 57–65.

204 **Ящерицын, П. И.** Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Высш. шк., 1977. – 254 с.

205 **Личковаха, А. С.** Повышение качества финишной обработки ремонтируемых гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / А. С. Личковаха. – зерноград, 2006. – 212 с.

206 **Носихин, П. И.** Повышение качества и ускорение обкатки отремонтированных дизелей на основе современных достижений трибологии : автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.20.03 / П. И. Носихин. – М., 1997. – 34 с.

207 **Пат 11856 РБ, МКИ³ В 24 В 39/00.** Инструмент для чистовой обработки внутренних поверхностей вращения заготовки методом пластического деформирования / А. П. Минаков, А. В. Куцеполенко, Е. В. Ильюшина. – № а 20070494 ; заявл. 02.05.07 ; опубл. 30.04.09, Бюл. № 2. – 10 с.

208 **Парфиянович, В. С.** Руководство по проектированию процессов чистового накатывания / В. С. Парфиянович. – Минск : Полымя, 1983. – 88 с.

209 **Комбалов, В. С.** Развитие теории и методов повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин / В. С. Комбалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 6. – С. 35–42.

210 **Фаршатов, В. М.** Исследование влияния процесса гидродинамического раскатывания блоков цилиндров Ваз на повышение их моторесурса : автореф. ... дис. канд. техн. наук / В. М. Фаршатов. – М., 1983. – 25 с.

211 **Николаев, В. В.** Технологическое обеспечение износостойкости деталей раскатыванием и обкатыванием (на примере пары цилиндр – поршневое кольцо) : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Николаев. – Владимир, 1986. – 227 с.

212 **Пат. 2521014 ФРГ, МКИ В 21 J 7/16.** Импульсно-ударный инструмент для чистовой обработки / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, В. Н. Леушкин, Г. М. Миронов, А. П. Минаков, В. В. Богачев (СССР). – № 1881669/25 ; заявл. 12.05.75 ; опубл. 20.03.80. – 13 с.

213 **Пат. 962408 Япония, МКИ В 24 В 39/02.** Инструмент для чистовой обработки / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, В. Н. Леушкин, Г. М. Миронов, А. П. Минаков (СССР). – № 1922021/25 ; заявл. 16.04.75 ; опубл. 11.11.79. – 10 с.

214 **Горохов, В. А.** Способы отделочно-упрочняющей обработки материалов : учеб. пособие / В. А. Горохов, Н. В. Спиридонов. – Минск : Технопринт, 2003. – 96 с.

215 Машиностроение : энциклопедия в 40 т. / В. В. Клюев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1998. – Т. IV–3. – 592 с.

216 **Оробинский, В. М.** Отделочные методы обработки и их оптимизация : учеб. пособие / В. М. Оробинский. – Волгоград : ВолгГТУ, 1994. – 94 с.

217 **Отений, Я. Н.** Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий : монография / Я. Н. Отений, Н. Я. Смольников, Н. В. Олыштынский. – Волгоград : ВолгГТУ, 2003. – 136 с.

218 **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием / А. Г. Суслов // Справочник. Инженерный журнал : прил. № 8. – 2003. – № 8. – С. 8–12.

219 **Тищенко, Э. Э.** Повышение эффективности отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Э. Э. Тищенко. – Ростов н/Д, 2004. – 152 с.

220 **Пат. 7519573 Франция, МКИ В 24 В 39/02.** Импульсно-ударный инструмент для чистовой обработки / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, В. Н. Леушкин, Г. М. Миронов, А. П. Минаков, В. В. Богачев (СССР). – № 2315354 ; заявл. 21.01.77 ; опубл. 02.12.77. – 20 с.

221 **Пат. 1463638 Великобритания, МКИ В 21 В 45/00.** Импульсно-ударный инструмент / П. И. Ящерицын, Ю. К. Голант, В. Н. Леушкин, Г. М. Миронов, А. П. Минаков, В. В. Богачев (СССР). – № 1881669/25 ; заявл. 07.05.75 ; опубл. 02.02.77. – 7 с.

222 Технологические основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении / А. П. Минаков [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2015. – 251 с.

Оглавление

Введение.....	3
1 Современные способы отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием.....	
1.1 Классификация деталей по категориям жесткости.....	5
1.2 Классификация способов отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием.....	9
1.3 Способ финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработки деталей.....	14
1.4 Суперфинишная пневмоцентробежная обработка внутренних цилиндрических поверхностей.....	19
1.5 Способ упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки деталей.....	24
1.6 Способ получения регулируемого микрорельефа.....	26
1.7 Способ комбинированной обработки внутренних поверхностей вращения.....	28
2 Механика процессов пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения.....	
2.1 Формирование микрорельефа и топографии поверхности.....	32
2.2 Кинематика и динамика процесса пневмоцентробежной обработки.....	33
2.3 Энергетический анализ работы пневмоцентробежного накатника.....	36
2.4 Основы проектирования технологического оснащения при разработке технологии пневмоцентробежной обработки.....	39
3 Механика процессов импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки.....	
3.1 Определение основных количественных параметров процесса при обработке внутренних поверхностей вращения.....	54
3.2 Влияние кинематических и динамических характеристик на процесс обработки деталей.....	56

3.3 Процессы и инструменты для обработки плоских поверхностей.....	60
3.4 Методика определения КПД инструмента и подводящей системы для ИУ ПВДО плоских поверхностей, учитывающая их аэродинамические характеристики.....	61
3.5 Процессы и инструменты для обработки наружных поверхностей вращения.....	67
4 Классификация кинематических схем пневмовибродинамической обработки.....	69
4.1 Класс кинематических схем пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения.....	75
4.2 Класс кинематических схем импульсно-ударной обработки внутренних поверхностей вращения.....	77
4.3 Класс кинематических схем пневмовибродинамической обработки наружных поверхностей вращения.....	78
4.4 Класс кинематических схем пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей.....	79
4.5 Класс схем инструментов центробежного действия для обработки внутренних поверхностей вращения.....	80
4.6 Класс схем инструментов импульсно-ударного действия для обработки внутренних цилиндрических поверхностей.....	99
4.7 Класс конструктивных схем инструментов для отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения.....	99
4.8 Класс конструктивных схем инструментов для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей.....	112
5 Исследование пневмоцентробежной обработки внутренних цилиндрических поверхностей при неподвижной заготовке.....	118
5.1 Исследование влияния аэродинамических характеристик процесса и инструмента на качество обработанной поверхности.....	118
5.2 Исследование процессов поверхностного пластического деформирования и тонкой абразивной обработки заготовок из закаленных сталей.....	124

5.3 Анализ результатов экспериментальных исследований качества механической обработки шатунов.....	133
5.4 Пневмоцентробежная обработка алюминиевых втулок.....	140

6 Исследование пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей, внутренних и наружных цилиндрических поверхностей с вращением заготовки

6.1 Влияние конструктивных параметров инструмента на шероховатость обработанной поверхности.....	141
6.2 Влияние режимов обработки на шероховатость упрочненной поверхности.....	147
6.3 Обработка керамическими шарами внутренних цилиндрических поверхностей стальных заготовок с твердостью ≤ 64 HRC.....	158
6.4 Пневмоцентробежная обработка внутренних цилиндрических поверхностей заготовок колец подшипников с высокой твердостью шарами из стали ШХ15 после абразивной пневмоцентробежной обработки.....	161
6.5 Импульсно-ударная обработка внутренних цилиндрических поверхностей	163
6.6 Технологические возможности упрочняющей пневмовибродинамической импульсно-ударной обработки наружных поверхностей вращения – нежестких штоков.....	165
6.7 Упрочняющая импульсно-ударная обработка плоских поверхностей.....	169

7 Исследование суперфинишной пневмоцентробежной обработки внутренних цилиндрических поверхностей.....

7.1 Технологические возможности процесса суперфинишной ПЦО при неподвижной заготовке	180
7.2 Технологические возможности процесса суперфинишной ПЦО с вращением заготовки	183

8 Корреляционный анализ шероховатости поверхностей и исследование их эксплуатационных свойств.....

8.1 Классификация шероховатых поверхностей	207
8.2 Взаимосвязь между параметрами шероховатости поверхности и эксплуатационными свойствами	209

8.3 Финишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка гильз двигателей внутреннего сгорания	211
8.4 Совершенствование технологии изготовления гильз двигателей	223
8.5 Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров	227
8.6 Предпосылки финишной упрочняющей пневмоцентробежной обработки рабочих поверхностей корпусов золотниковых коробок и других приравненных к ним деталей.....	240
8.7 Влияние поверхностного деформирования на усталостную прочность деталей.....	242
9 Техничко-экономическая эффективность пневмовибродинамической обработки	249
9.1 Разработка опытно-промышленного образца инструмента для обработки сферической поверхности и проведение поисковых исследований.....	249
9.2 Техничко-экономические показатели процесса пневмоцентробежной отделочно-упрочняющей обработки.....	254
9.3 Результаты внедрения пневмоцентробежной обработки в производство.....	256
9.4 Результаты внедрения импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей в производство.....	259
9.5 Импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка нежестких штоков и ее эффективность.....	264
9.6 Практическое использование суперфинишной пневмоцентробежной обработки внутренних поверхностей вращения в производстве.....	266
Заключение.....	268
Список литературы.....	271

Научное издание

Минаков Анатолий Петрович
Ильюшина Елена Валерьевна
Камчицкая Ирина Дмитриевна и др.

**ТЕХНОЛОГИЯ
ФИНИШНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ
ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Редактор Т. А. Рыжикова

Художественное оформление обложки Е. С. Фитцова

Технический редактор А. А. Подошевка

Компьютерный дизайн Н. П. Полевничая

Подписано в печать 01.02.2016. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 17,08. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 100 экз. Заказ № 62.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.