

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Колесник Василий Михайлович

УДК 621.923.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА  
ХОНИНГОВАНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент Буюкли И.М.

Одесса – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ХОНИНГОВАНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ.....	10
1.1. Точность изготовления и технические характеристики изделий с глухими отверстиями на примере аксиально-поршневого насоса.....	10
1.2 Финишные способы обработки высокоточных отверстий.....	14
1.3 Особенности хонингования глухих отверстий.....	17
1.4 Выводы по обзору. Цель и задачи исследования.....	28
РАЗДЕЛ 2. АНАЛИЗ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ.....	30
2.1 Современные представления о погрешностях формы в продольном сечении при хонинговании отверстий.....	30
2.2. Схемы формирования погрешности формы отверстий в продольном сечении при радиальной дискретной непрерывной подаче и подаче по давлению.....	32
2.3. Схемы формирования погрешности формы отверстий в продольном сечении при дискретной дозированной радиальной подаче.....	40
2.4. Выводы по второму разделу.....	44
РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ПО ДЛИНЕ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ.....	45
3.1 Уравнение скорости возвратно-поступательного перемещения режущих элементов инструмента.....	46
3.2 Уравнение распределения усилий по длине режущих элементов инструмента.....	52
3.3 Исследование влияния параметров наладки на темп износа режущих элементов по их длине при хонинговании.....	62
Вывод по третьему разделу.....	68

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ ХОНИНГОВАНИЯ.....	69
4.1 Разработка способов хонингования на основе само-формирования в процессе износа цилиндричности рабочей части инструмента.....	69
4.1.1 Разработка способа хонингования с управляемым темпом съема металла при прямом и возвратном перемещениях инструмента.....	69
4.1.2. Экспериментальная апробация разработанного способа.....	71
4.1.3 Разработка способа хонингования с переменной износостойкостью по длине режущих элементов.....	74
4.2. Разработка способа хонингования за счет изменения продольной ориентации режущих элементов.....	83
4.2.1 Сравнительный анализ эффективности и технологических возможностей известного и разработанного способов.....	87
4.3 Разработка способа хонингования на основе компенсации неравномерности износа по длине режущих элементов.....	91
4.3.1 Анализ работоспособности конструкции инструмента с фиксированными осями поворота режущих элементов.....	91
4.3.2. Разработка способа хонингования глухих отверстий и инструмента для его реализации.....	98
4.3.3 Вывод уравнения для определения основных конструктивных параметров разработанного инструмента.....	102
4.4. Вывод по четвертному разделу.....	111
ВЫВОДЫ .....	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	115
Приложение А «Патент и формула изобретения № 103959».....	124
Приложение Б «Патент и формула изобретения № 104785».....	126
Приложение В «Патент и формула изобретения № 107816» .....	128
Приложение Г «Известные экспериментальные данные по хонингованию»...	130
Приложение Д «Модуль обработки тензометрической информации» .....	137

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в машиностроении доминируют способы лезвийной и абразивной обработки деталей машин. При этом, с развитием машиностроения, имеет место тенденция непрерывного и существенного увеличения доли трудоемкости операций абразивной обработки в общей трудоемкости операции механической обработки. Например, по данным заводов по изготовлению подшипников качения на их долю приходится до 90% от общей трудоемкости всех выполняемых операций.

**Актуальность.** Поэтому одной из важнейших задач в области машиностроения является повышение общей эффективности абразивной обработки и, в частности, дальнейшее повышение точности с одновременным повышением и других параметров эффективности абразивной обработки отверстий в деталях машин [85].

Высокоточные отверстия имеются в корпусных деталях, в деталях топливной и гидра- аппаратуры, в цилиндрах и блоках цилиндров двигателей, насосов, компрессоров гидра- агрегатов и т.д. Значительная часть указанных отверстий конструктивно выполнены глухими. Кроме того, с целью защиты от коррозии и повышения износостойкости на рабочие поверхности указанных отверстий наносят износостойкие и антикоррозионные покрытия, либо эти поверхности подвергают закалке на достаточно высокую твердость, до 60 – 65 ед. по HRC.

В этих случаях изменяется исходная геометрическая форма и шероховатость поверхности, что обуславливает необходимость последующей механической обработки, которая, в связи с высокой твердостью поверхности, может производиться только с применением алмазного инструмента.

Из известных способов обработки для данного перечня деталей наиболее востребованным является хонингование. По данным, приведенным в работах [3, 31, 86, 87], алмазное хонингование повышает долговечность и эксплуатационную надежность деталей машин.

Однако, при хонинговании глухих отверстий отсутствует возможность организации цикла обработки с оптимальной величиной перебега в зоне дна обрабатываемого отверстия, что обуславливает неизбежность генерирования погрешности в виде конусности [4, 8, 9, 15, 18, 19, 20, 21]. В частности, экспериментально установлено, что при обработке глухих отверстий по традиционной схеме хонингования, величина генерируемой погрешности в виде конусности достигает порядка 130 мкм [83].

Для уменьшения величины этой погрешности разработан ряд способов, которые описаны в технической литературе [78, 80, 55, 85, 83] и суть которых состоит в том, что имеет место:

- вынужденное увеличение числа технологических переходов и числа периодических правок режущих элементов, с целью восстановления соответствующей формы рабочей части инструмента;

- управление циклами обработки таким образом, что сначала осуществляют длинноходовое хонингование по всей длине отверстия, а в конце, в зоне дна обрабатываемого отверстия, – короткоходовое; либо варьирование скоростью возвратно-поступательного перемещения с уменьшением последней в зоне дна обрабатываемого отверстия и т.д.;

- введение компенсационной размерной подналадки, например, осуществляемой в виде дополнительного поворота режущих элементов, реализуемого синхронно с радиальной подачей последних и др.;

- использование специальных режущих элементов с переменной износостойкостью по длине и т.д.

Эти способы, наряду с их достоинствами, обладают существенными недостатками по эффективности, что обуславливает необходимость их дальнейшего совершенствования.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в рамках тематических планов НИР кафедры «Технология машиностроения» Одесского национального политехнического университета на

основе темы «Розробка та дослідження ресурсозберігаючих технологій при лезовій та абразивній обробці» (ДР № 0113U001462).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение точности и эффективности обработки глухих отверстий посредством совершенствования существующих и создания новых способов хонингования и технологического оснащения.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ механизма формирования погрешностей формы в продольном сечении на операциях хонингования отверстий.

2. Разработать математическую модель и исследовать функциональную зависимость неравномерности размерного износа по длине режущих элементов инструмента от параметров обработки.

3. Создать новые, более эффективные способы хонингования глухих отверстий и разработать технологическое оснащение для реализации этих способов.

4. Провести экспериментальную проверку теоретических положений исследования.

**Объектом исследования** является технологические операции и технологическое оснащение алмазного хонингования высокоточных глухих отверстий деталей машин.

**Предметом исследования** является теоретическое и экспериментальное исследование условий повышения точности при хонинговании глухих отверстий на основе выявления закономерностей формирования погрешностей в продольном сечении и создание новых компенсационных механизмов.

**Методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования базируются на фундаментальных положениях технологии машиностроения, теории износа, теории резания материалов, теоретической механики, сопротивления материалов, математического анализа, математического моделирования, теории обобщенных функций, теории

вероятности и математической статистики. Экспериментальные исследования выполнены на хонинговальном станке модели 3822 оснащенном тензометрическим столом с применением модуля обработки тензометрической информации на базе блока АЦП модели ADS1256. При этом для тарировки использовался динамометр RWDF 12, а для контроля размеров обрабатываемых отверстий нутромер с оптическим микронным индикатором.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем.

1. Впервые установлены (на основе эффекта взаимной правки) закономерности формирования профилей в продольных сечениях хонингуемых глухих отверстий и рабочей части инструмента в зависимости от параметров обработки, в том числе, от вида и величины радиальной подачи, что позволило определить возможные технологические механизмы управления точностью обработки глухих отверстий.

2. Получила дальнейшее развитие теория управления точностью обработки при хонинговании глухих отверстий. Впервые предложены решения расширяющие технологические возможности процесса хонингования. Сущность этих решений состоит в том, что в процессе съема припуска имеет место управление нивелированием геометрических погрешностей за счет:

- варьирования соотношением величин удаляемого припуска при поступательном и возвратном перемещениях за время одного двойного хода;
- стабилизации размерного износа по длине режущих элементов посредством периодической смены их ориентации;
- введения независимых компенсационных перемещений, величина которых пропорциональна разности износов режущих элементов по длине.

3. Впервые с использованием теории обобщенных функций получены обобщенные уравнения возвратно-поступательного перемещения исполнительных органов станка с гидравлическим приводом, изменения радиальной составляющей сил резания и, на их основе, уравнение износа

режущих элементов по их длине за время одного двойного хода, которое может быть использовано для изучения влияния технологических параметров процесса обработки на величину генерируемой геометрической погрешности.

4. Впервые получена математическая зависимость для выбора и оптимизации конструктивных параметров инструмента с целью обеспечения линейной зависимости величин осевого перемещения разжимного элемента и компенсационного угла поворота режущих элементов.

5. Установлено, что величина, равная отношению суммарной ширины режущих элементов к длине окружности обрабатываемого отверстия, для известных операций хонингования является случайной и подчиняется закону нормального распределения.

**Практическая ценность работы** состоит в создании новых способов хонингования глухих отверстий в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, что позволило расширить технологические возможности процесса хонингования и, особо, существенно повысить геометрическую точность отверстий в продольном сечении (Патент UA №104785; Патент UA №103959; Патент UA №107816).

Разработанные способы могут быть внедрены в действующие технологические процессы обработки отверстий с незначительной модернизацией существующего технологического оборудования.

Результаты работы могут быть внедрены при конструировании нового поколения хонинговальных станков, оснащенных системами управления точностью обработки отверстий.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты, представленные к защите полученные соискателем самостоятельно. Постановка научных задач и обсуждения результатов проводились совместно с научным руководителем. В работах опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: исследование параметров известной конструкции включающий возможность компенсационного поворота режущих элементов в процессе удаления припуска и определения возможностей ее совершенствования [20]; выбор наиболее



характерных операций хонингования отверстий и статистическая обработка параметров этих операций [21]; обоснование выбора показателя степени в уравнении для возвратно-поступательного перемещения исполнительных органов станков, оснащенных гидроприводом [15, 17]; математическое выражение и алгоритм для определения необходимого компенсационного угла поворота режущих элементов [19]; установление закономерностей изменения профиля режущих элементов по их длине при различных видах радиальной подачи [18]; предложение о ведении в процесс расточки, наряду с круговыми, стандартных резцов с разделением припуска между ними по глубине и подачей [16].

**Апробация результатов диссертации.** Научные результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции: XIV Международная научно-техническая конференция АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика». - (Одесса 2013).

По результатам исследований получены следующие охранные документы: Патент UA №104785; Патент UA №103959; Патент UA №107816.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано семь научных работ, в том числе 5 статей в специализированных изданиях Украины (4 из которых входят в международные наукометрические базы РИНЦ, eLIBRARY, EBSCOHost, Google Scholar, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Ulrich's Periodicals Directory, DOI CrossRef), 1 тезисы доклада в сборнике научных трудов конференции.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложений и списка использованной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страницы, из них 47 иллюстраций, 88 наименований использованных источников на 8 страницах, 5 приложений на 20 страницах.

## РАЗДЕЛ 1

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ХОНИНГОВАНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

#### 1.1. Точность изготовления и технические характеристики изделий с глухими отверстиями на примере аксиально-поршневого насоса

Обработка высокоточных отверстий относится, с одной стороны, к числу достаточно широко распространенных технологических операций в машино- и приборостроении, а с другой стороны, операции обработки высокоточных отверстий, в целом, характеризуются существенно большей трудоемкостью, чем обработка точных наружных поверхностей деталей, так как отверстия сравнительно труднодоступны, а инструменты для их обработки обладают меньшей жесткостью и размерной стойкостью [59 – 61]. В связи с этим, при прочих равных условиях, допускаемые отклонения размеров отверстий и, особо, глухих отверстий существенно больше, чем допускаемые отклонения размеров валов.

В частности, к отверстиям блока цилиндров аксиально-поршневого насоса при изготовлении предъявляются следующие требования: допуск на диаметральный размер в 25 мм составляет 15 мкм (это приблизительно 6 квалитет); шероховатость поверхности Ra 0,8 мкм; отклонение формы в продольном и поперечном сечениях при глубине отверстия 77 мм менее 5 мкм.

В свою очередь к поршню, после его сборки с шатуном, предъявляются следующие требования к изготовлению: допуск на диаметр 25 мм составляет 6 мкм (это приблизительно 4 квалитет); шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм; отклонение формы в продольном и поперечном сечениях по длине поршня 75 мм менее 4 мкм.

Далее выполним краткий анализ взаимосвязи величины компрессии (величины утечек рабочего агента), как основной технической характеристики изделия, и точности изготовления указанной пары.

На рис. 1.1 и 1.2 представлены расчетные схемы для определения величины утечек между двумя цилиндрическими поверхностями (поршнем и цилиндром), которая определяется по формуле (1.1) [13 23]

$$Q_3 = Q_0 \left( 1 + \frac{2}{3} \varepsilon^2 \right) = a_0^3 \cdot \frac{P \cdot 2\pi}{12\mu l} \cdot \left( 1 + \frac{2}{3} \varepsilon^2 \right) \quad (1.1)$$

где:  $Q_0$  – величина утечек при соосном расположении поршня и цилиндра;

$a_0 = R - r$  – разность между радиальными размерами цилиндра и поршня, мм;

$\varepsilon = e/a_0$  – отношение величины эксцентриситета  $e$  к  $a_0$ ;

$\varphi$  – угловой параметр;

$p_{тр}$  – разность давлений в Мпа (перепад) в рассматриваемых крайних сечениях по длине контакта поршня с цилиндром  $l = 5,7$  мм;

$\mu$  – динамическая вязкость моторного масла SAE 10 (при 20 С°) 0,065 П·с [71, 81];

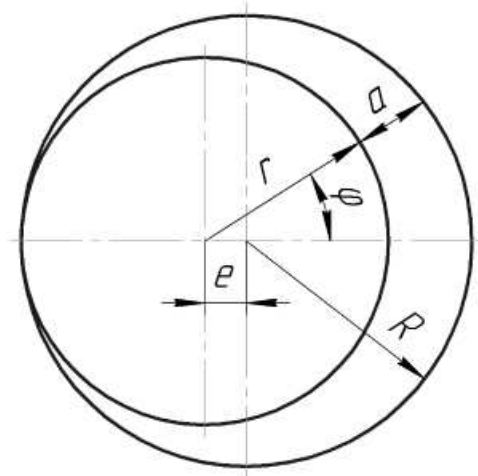
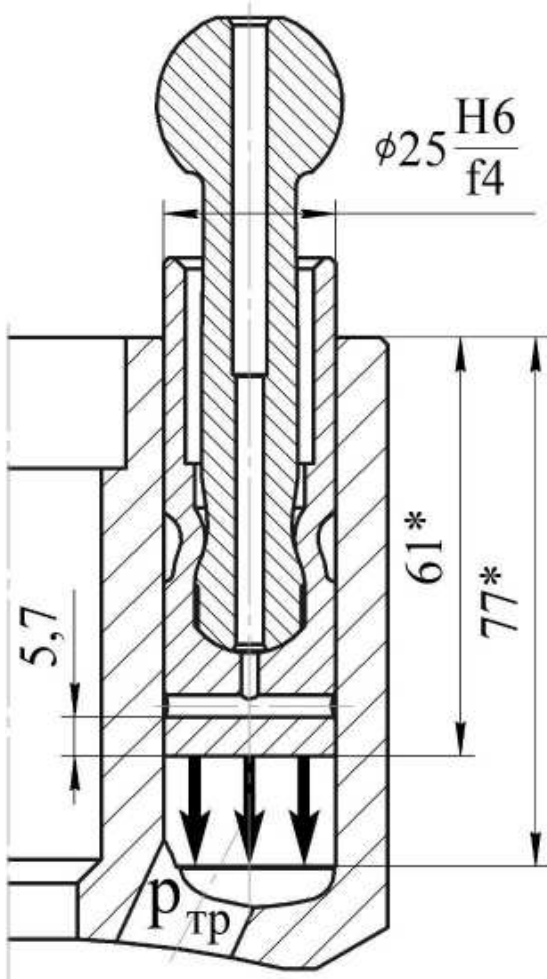


Рис. 1.1. Расчетная схема для определения величины утечек между двумя цилиндрическими поверхностями аксиально-поршневого насоса (пара поршень – цилиндр)

Рис. 1.2. Расчетная схема для определения величины утечек между двумя цилиндрическими поверхностями аксиально-поршневого насоса (пара поршень – цилиндр) при схеме эксцентрического зазора между ними

В соответствии с формулой (1.1) и схемами (рис. 1.1 и рис. 1.2) определим величину утечек в зависимости от точности изготовления при давлениях в рабочей полости  $p_{mp} = 1,6; 3,2$  и  $6,3$  МПа. Данные расчетов представлены в таблице 1.1 и в виде графиков на рис. 1.2.

Таблица 1.1

Расчетные данные утечек  $Q$  в кольцевом зазоре

Посадка	Отклонения размера отверстия, мм	Отклонения размера поршня, мм	Зазор $a_0$ , мм	Утечки в кольцевом зазоре $Q$ , л/с при давлениях в рабочей полости $P$ , МПа		
				$P = 1,6$	$P = 3,2$	$P = 6,3$
<b>H6/f4</b>	<b>0,015/0</b>	<b>-0,018/0,024</b>	<b>0,0195</b>	<b>0,000349</b>	<b>0,000699</b>	<b>0,001388</b>
H5/f4	0,009/0	-0,018/0,024	0,0165	0,000212	0,000423	0,000841
H5/g4	0,009/0	-0,007/-0,013	0,011	0,000063	0,000126	0,000249
H5/h4	0,009/0	0/-0,006	0,006	0,00001	0,00002	0,00004

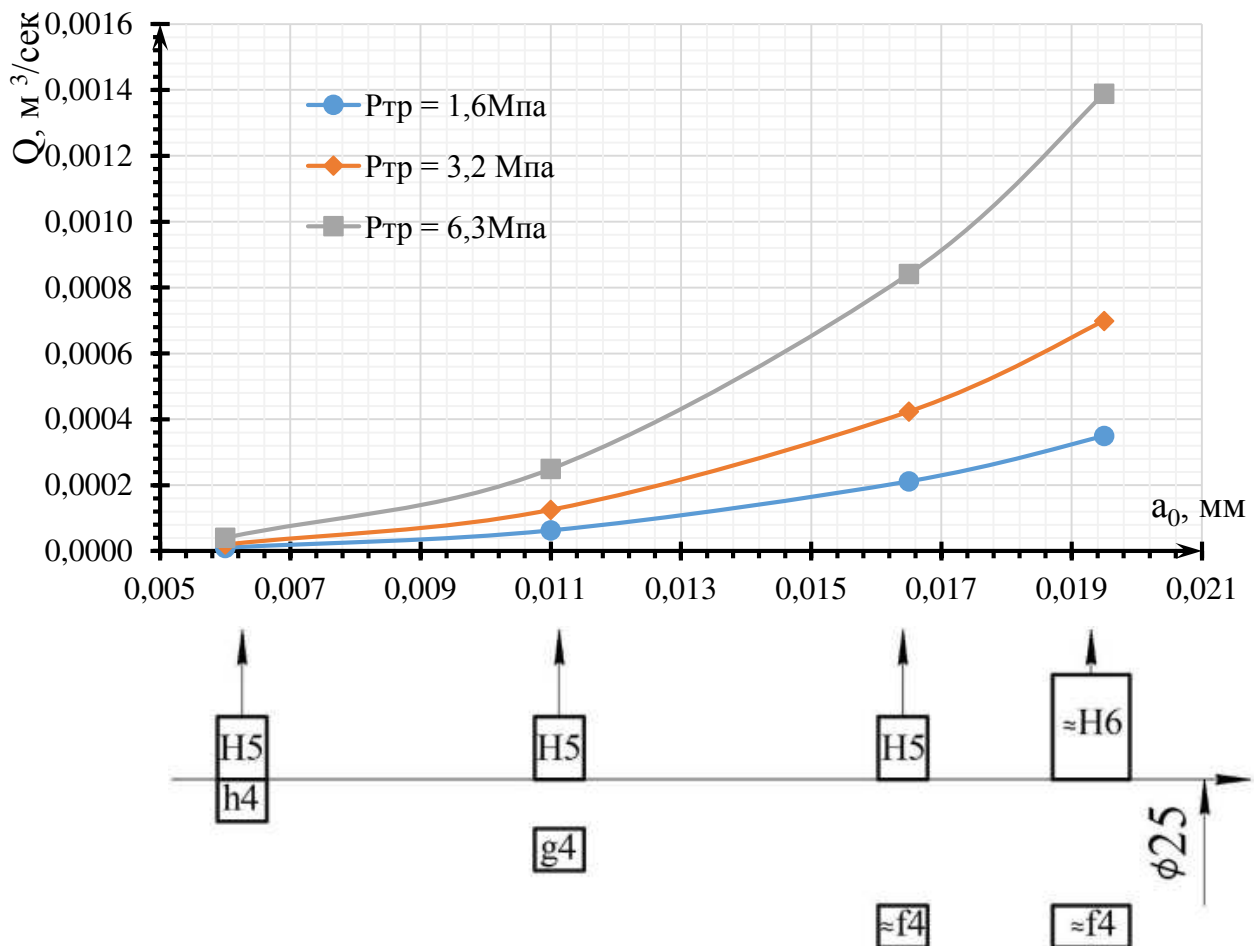


Рис. 1.3 График зависимости утечек  $Q$ , л/сек от точности изготовления пары цилиндр и поршень при следующих давлениях в рабочей полости  $p_{mp} = 1,6; 3,2$  и  $6,3$  МПа

### **Примечания.**

1. Рекомендуемые посадки в общем машиностроении [74, 28] для вая и отверстия либо равны, либо отличаются, но не более, чем на один квалитет.

2. Посадка H6/f4 соответствует существующим в настоящее время техническим требованиям к изготовлению пары поршень-цилиндр на Одесском заводе Строй-Гидравлика и не соответствует рекомендуемым машиностроению посадкам. Обусловлено это технологическими ограничениями по точности изготовления отверстий в блоке цилиндров.

Заметим, что это противоречие может быть устранено совершенствованием технологического процесса изготовления глухих отверстий в блоке цилиндров. Тогда возможен переход в указанной паре на посадку H5/f4 и, более того, на посадку H5/g4. В этом случае утечки в паре уменьшатся более чем в 5 раз.

3. Кроме указанного противоречия, здесь уместно отметить и другое, не менее значимое противоречие, которое существует при конструировании деталей машин. Достаточно часто, по функциональному признаку, целесообразно в деталях машин выполнить отверстия конструктивно глухими. Однако, с учетом технологических ограничений такие отверстия конструируют сквозными (более технологичными) и искусственно переводят в разряд глухих, закрывая одну из сторон, например, крышкой, что снижает технические параметры машин (габариты, металлоемкость, герметичности и т.д.).

**Вывод.** Изложенное выше наглядно, на конкретном примере, демонстрирует актуальность проблемы повышения точности изготовления глухих отверстий.

## 1.2 Финишные способы обработки высокоточных отверстий

Основные методы финишной обработки отверстий [67, 26, 30, 32, 35, 36, 43, 48, 49, 51, 76, 79,] и основные параметры, обеспечиваемые этими методами, приведены в табл. 1.2. и, для наглядности, продублированы в виде графиков на рис. 1.4 ÷ 1.6.

Таблица 1.2.

Параметры, обеспечивающие финишные методы обработки

Метод обработки		Квалитет точности	Погрешность формы, $\Delta$ , мм		Шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм		Глубина дефектного слоя $h$ , мм	
Лезвийным инструментом	Высокоскоростное тонкое фрезерование	7 8	0,01	0,02	0,63	1,25	0,01	0,05
	Тонкое алмазное растачивание	6 7	0,003	0,01	0,063	0,32	0,01	0,05
	Тонкое развертывание	7 9	0,05	0,1	0,63	1,25	0,01	0,02
Абразивным инструментом	Тонкое шлифование	5 6	0,002	0,005	0,08	0,32	0,005	0,03
	Алмазное развертывание	6 7	0,02	0,05	0,16	0,32	0,005	0,02
	Хонингование	4 5	0,002	0,003	0,04	0,16	0,005	0,02
	Доводка	3 4	0,0001	0,001	0,02	0,08	0,003	0,01

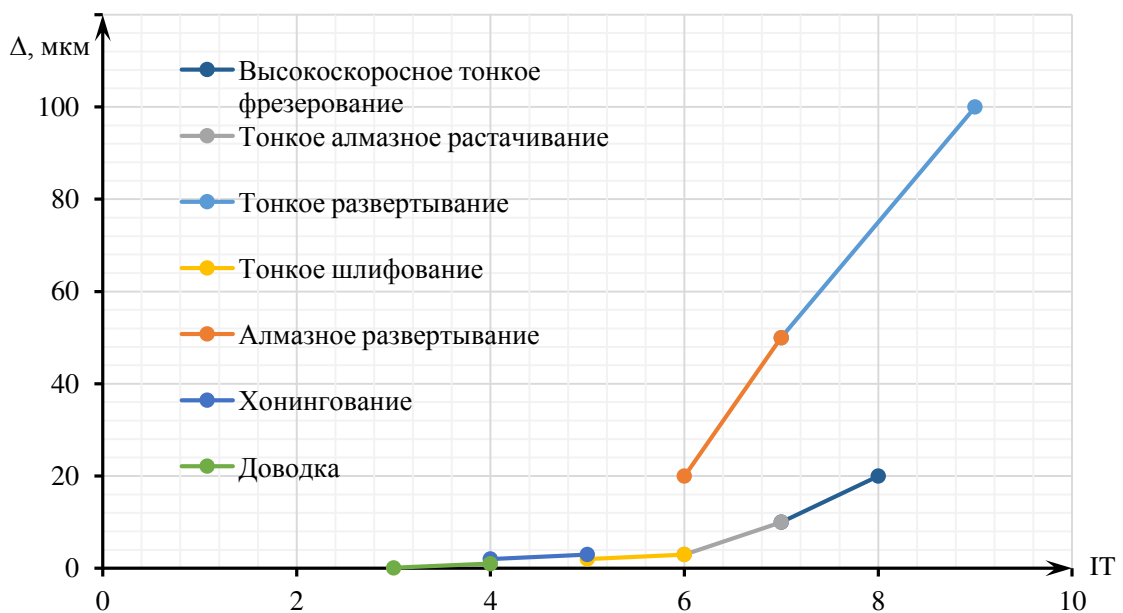


Рис. 1.4. Сравнительная характеристика финишных методов обработки отверстий по точности

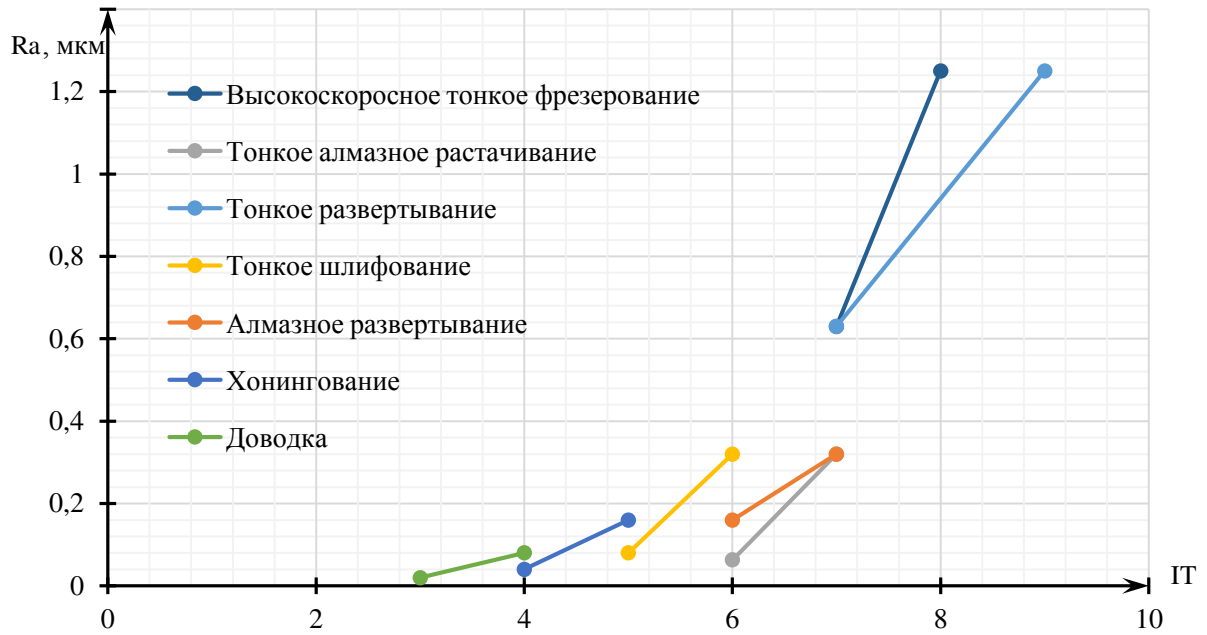


Рис. 1.5. Сравнительная характеристика финишных методов обработки отверстий по шероховатости

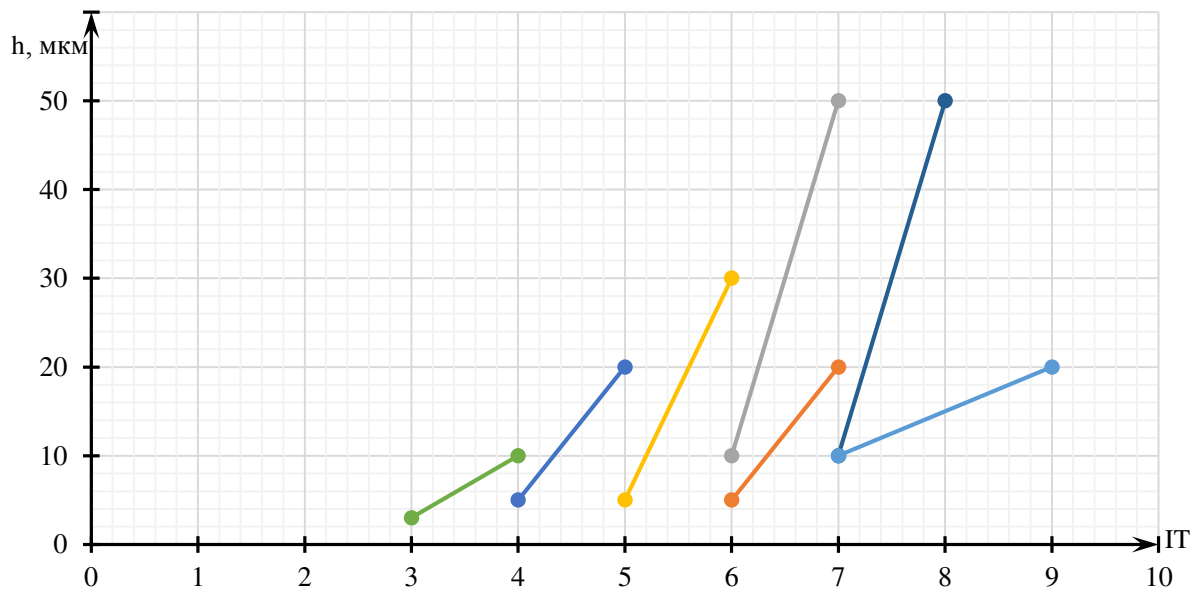


Рис. 1.6. Сравнительная характеристика финишных методов обработки отверстий по величине дефектного слоя

Из графиков (рис. 1.4 ÷ 1.6) видно, что хонингование и доводка отверстий показывают наилучшие результаты по точности и качеству отверстий. Доводка на практике применяется крайне редко в силу низкой производительности [36].

Приведенные данные, по умолчанию, соотносятся с обработкой класса сквозных отверстий в деталях из традиционных конструкционных материалов, таких как серый чугун и конструкционные стали твердостью до 48 ед. по HRC. При этом, обработка осуществляется традиционным инструментом, конструктивная схема которого здесь приведена на рис. 1.7 в том числе и для случая хонингования глухих отверстий [4, 2, 27, 80].

На рис. 1.7. длина хода инструмента равна

$$l_x = l_{отв} - l_{бр} + l_{пер1} + l_{пер2}. \quad (1.2)$$

Отметим, что конструктивные параметры режущих элементов инструмента, параметры наладки станков и режимы обработки для выполнения операций хонингования рекомендуется выбирать из следующих соотношений [42, 70, 83, 7, 11, 12, 39, 45, 47, 80]:

$$l_{бр} = (1,2 \div 0,8)l_{отв} \quad (1.3)$$

$$l_{пер} = \left(\frac{1}{3} \div \frac{3}{4}\right)l_{бр} = opt \quad (1.4)$$

и дополнительно, с целью обеспечения перекрытия хода брусков,

$$l_{бр} = \frac{3\pi \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2z} \quad (1.5)$$

$$z = (0,25 \div 0,35) \frac{\pi D}{B} \quad (1.6)$$



Рис. 1.7. Конструктивная схема инструмента для хонингования глухих отверстий



где:  $l_{отв.}$  и  $D$  – длина и диаметр хонингуемого отверстия;

$l_{бр.}$ ,  $B$  и  $z$  – соответственно длина, ширина и количество режущих элементов (алмазоносных брусков) инструмента;

$\alpha$  – угол подъема траектории движения брусков;

$l_{пер.1}$  и  $l_{пер.2}$  – перебеги режущей части инструмента соответственно с одной и с другой стороны отверстия.

Однако, при необходимости хонингования «нестандартных» отверстий выполнение указанных соотношений не всегда возможно. В частности, при хонинговании коротких отверстий ( $l_{отв.}/d \ll 1$ ) и длинных отверстий ( $l_{отв.}/d \gg 1$ ) невозможно обеспечить соотношение (1.3). Аналогично, при хонинговании глухих отверстий невозможно обеспечить оптимальную величину перебега в зоне дна обрабатываемого отверстия, т.е. соотношение (1.4). При этом, неизбежно возникают соответствующие погрешности формы в продольном сечении.

### 1.3 Особенности хонингования глухих отверстий

Ниже остановимся на наиболее характерных конструкторских и технологических решениях, направленных на повышение эффективности хонингования глухих отверстий.

Известно техническое решение [1, 5, 6, 22, 46, 70], которое заключается в том, что при обработке поверхности глухого отверстия целесообразно применение такой формы хонинговальных брусков, при которой обеспечивается расположение наибольшего количества режущих зерен возможно ближе к торцу рабочей части инструмента в зоне дна обрабатываемого отверстия (бруски трапециевидной формы и другой комбинации брусков разной длины, которая эквивалентна бруску указанной формы).

На рис. 1.8 и в таблице 1.3 представлены, соответственно, конструкция бруска трапециевидной формы и результаты экспериментальной проверки его исправляющей способности при хонинговании глухих отверстий.

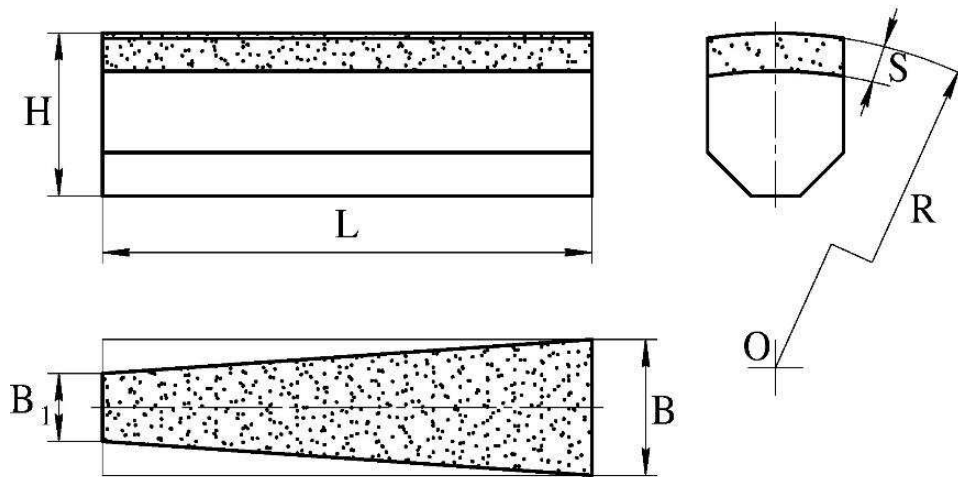


Рис. 1.8 Конструкция трапецидального бруска

Таблица 1.3

Геометрическая точность отверстий при хонинговании трапецидальными брусками

Форма бруска	Данные бруска					Средние показатели, мКм	
	L	B	B <sub>1</sub>	ε	F	конусообразности	овальности
	мм				мм <sup>2</sup>		
Прямоугольная	50	10	10	1,0	2000	+130	10
Трапецидальная	50	10	5	0,5	1500	+74	5
Трапецидальная	50	10	3	0,3	1300	-62	5

Экспериментальные данные получены при хонинговании глухих отверстий в образцах из термически необработанной стали 45 ( $d_{\text{отв}} = 40$  мм;  $l_{\text{отв}} = 150$  мм) с исходной конусообразностью 0,03 ... 0,04 мм брусками АСР 125/100 – М1 – 100 с суммарной площадью режущей части алмазоносного слоя F (при числе брусков  $z = 4$ ). Установлено, что степень исправления конусообразности отверстия зависит от отношения оснований трапеции

$$\varepsilon = B_1/B. \quad (1.7)$$

Как видно из таблицы 1.3, для данного конкретного случая, эффективное исправление конусности достигается при значениях  $\varepsilon = 0,35 \div 0,4$ .

Известен также способ хонингования, при котором [83] и (стр. 372 Рис. 14.58. 14.59 [85]), варьируют интенсивностью съема припуска по длине обрабатываемого отверстия. Этот способ может быть реализован по нескольким (простым и комбинированным) схемам.

Здесь, при обработке сквозных отверстий хонингование осуществляют сравнительно короткими брусками при коротко-ходовом возвратно-поступательном перемещении инструмента в отдельных местах по длине хонингуемого отверстия, а именно в тех местах где диаметральный размер минимален рис. 1.9.



Рис. 1.9. Принципиальная схема автоматической коррекции хода при измерении широких или узких мест в отверстии: а – цилиндрическом; б – коническом с расширением внизу; в – коническом с расширением вверх; г – бочкообразном; д – седлообразном; е – изменение длины хода после замера входного расширения; 1 ÷ 3 – различные уровни измерений; 4 – пневматическая измерительная оправка; 5 – брусок;  $L_H$  – длина хода;  $L_{H0}$  – верхняя коррекция;  $L_{Hu}$  – нижняя коррекция.

При обработке глухих отверстий применяются комбинированные схемы.

Одна из схем отличается тем, что длинно-ходовое возвратно-поступательное движение инструмента с односторонним перебегом периодически чередуется коротко-ходовым возвратно-поступательным перемещением в зоне дна обрабатываемого отверстия рис. (1.10 б).

По другой схеме длинно-ходовое возвратно-поступательное движение инструмента с односторонним перебегом периодически чередуется управляемой короткой задержкой возвратно-поступательного движения (амплитуда коротко-

ходового возвратно-поступательного перемещения равна нулю) при сохранении вращательного движения инструмента в зоне дна обрабатываемого отверстия.

Исследования эффективности приведенных выше схемы для хонингования глухих отверстий представлены в работе [50] и, здесь, частично

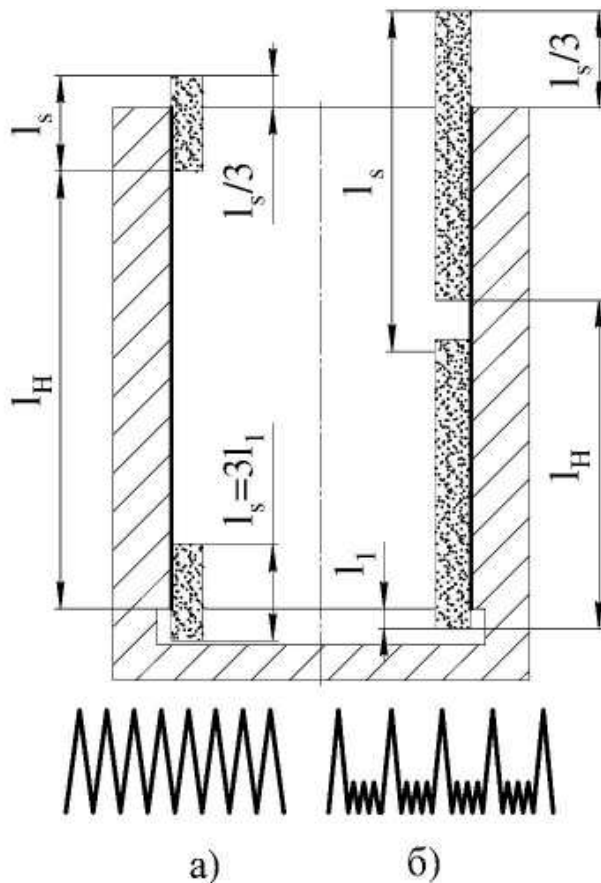


Рис. 1.10. Движение хона при вторичном хонинговании глухих отверстий: а – коротким бруском ( $L_s = 3l_1$ ), обычное возвратно-поступательное движение, нормальный перебег; б – бруском нормальной длины;  $L_H$  – длина хода;  $L_s$  – длина бруска;  $l_1$  – длина канавки

что на этапе длинно-ходового хонингования формируется геометрическая погрешность в виде конусности, как на обрабатываемом отверстии, так и на режущей части инструмента. Далее, при переходе на коротко-ходовое хонингование, либо на хонингование с нулевой амплитудой возвратно-поступательного движения, приобретенная конусообразность рабочей части инструмента сохраняется и переносится на обрабатываемое отверстие. То есть,

представлены на рис. 1.11 и 1.12. Отмечается (рис. 1.9), что имеет место повышение точности за счет увеличения времени задержки брусков у дна отверстия, однако при этом констатируется следующее.

Зависимость повышения точности формы отверстия от времени задержки брусков является экстремальной. Поэтому увеличение времени задержки свыше оптимального приводит только к увеличению овальности и отклонения профиля продольного сечения.

Иными словами, достичь полного исправления геометрической погрешности в виде конусности указанным способом невозможно. Это объясняется тем,

сохраняется конусность в зоне дна обрабатываемого отверстия, длина которой соизмерима с длиной рабочей части инструмента.

Другим недостатком является то обстоятельство, что при переходе на коротко-ходовое хонингование, либо на хонингование с нулевой амплитудой возвратно-поступательного движения, неизбежно нарушается оптимальное соотношение скоростей возвратно-поступательного и вращательного движений.

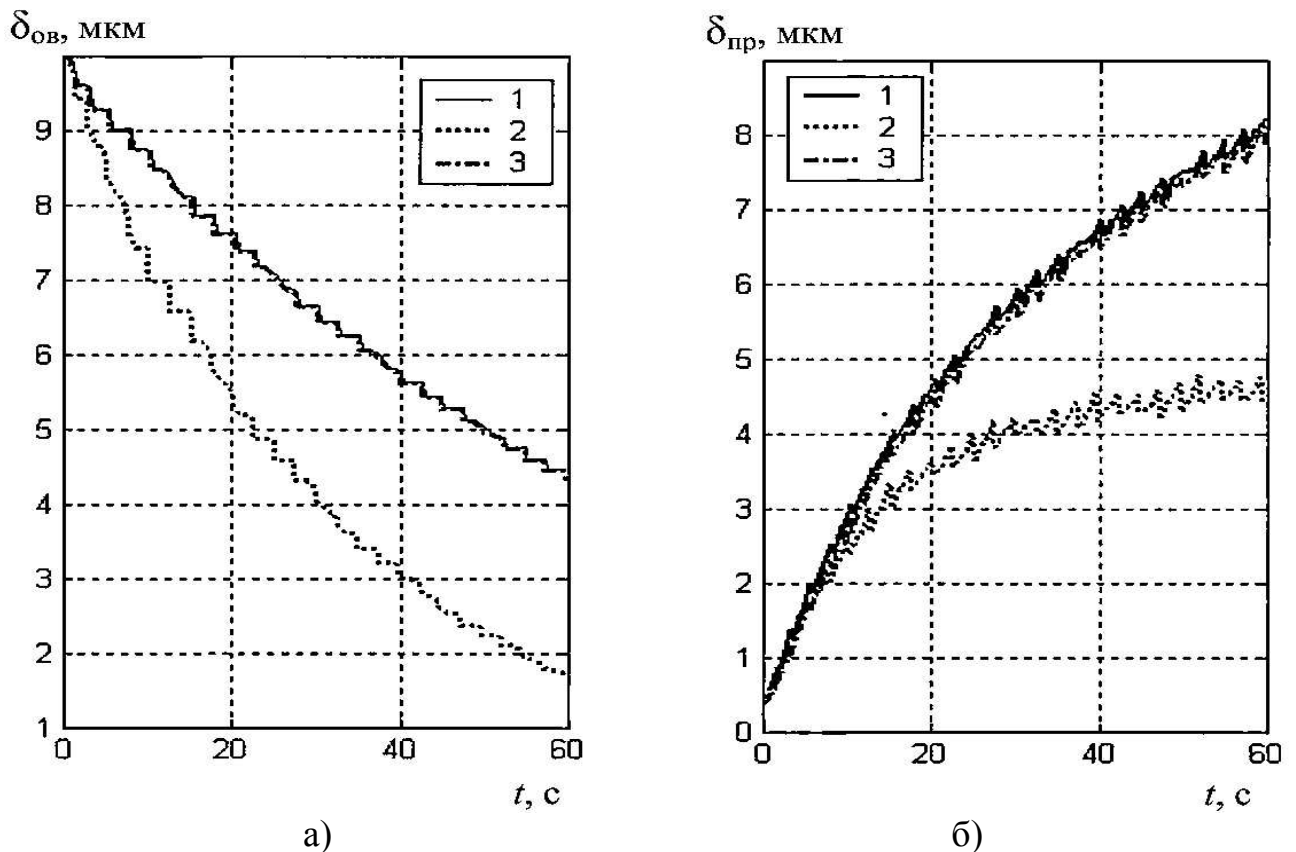


Рис. 1.11 Изменение овальности  $\delta_{ов}$  (а) и отклонения профиля продольного сечения  $\delta_{пр}$  (б) при обработке: 1 – стандартными брусками; 2 – трапецевидной формы; 3 – изменяемой длины

Это приводит, во-первых, к потере производительности из-за уменьшения пути резания режущих зерен в единицу времени. Во-вторых, на ранее сформированную оптимальную сетку следов режущих зерен, которая соответствует оптимальному маслоудерживающему рельефу, происходит наложение искаженной, из-за нарушения оптимального соотношения скоростей, сетки следов режущих зерен. То есть, на поверхности формируются поочередно две разновидности рельефа: одна – оптимальная, другая – отличная от

оптимальной. При этом не известно, какая из них будет сформирована в конце обработки.

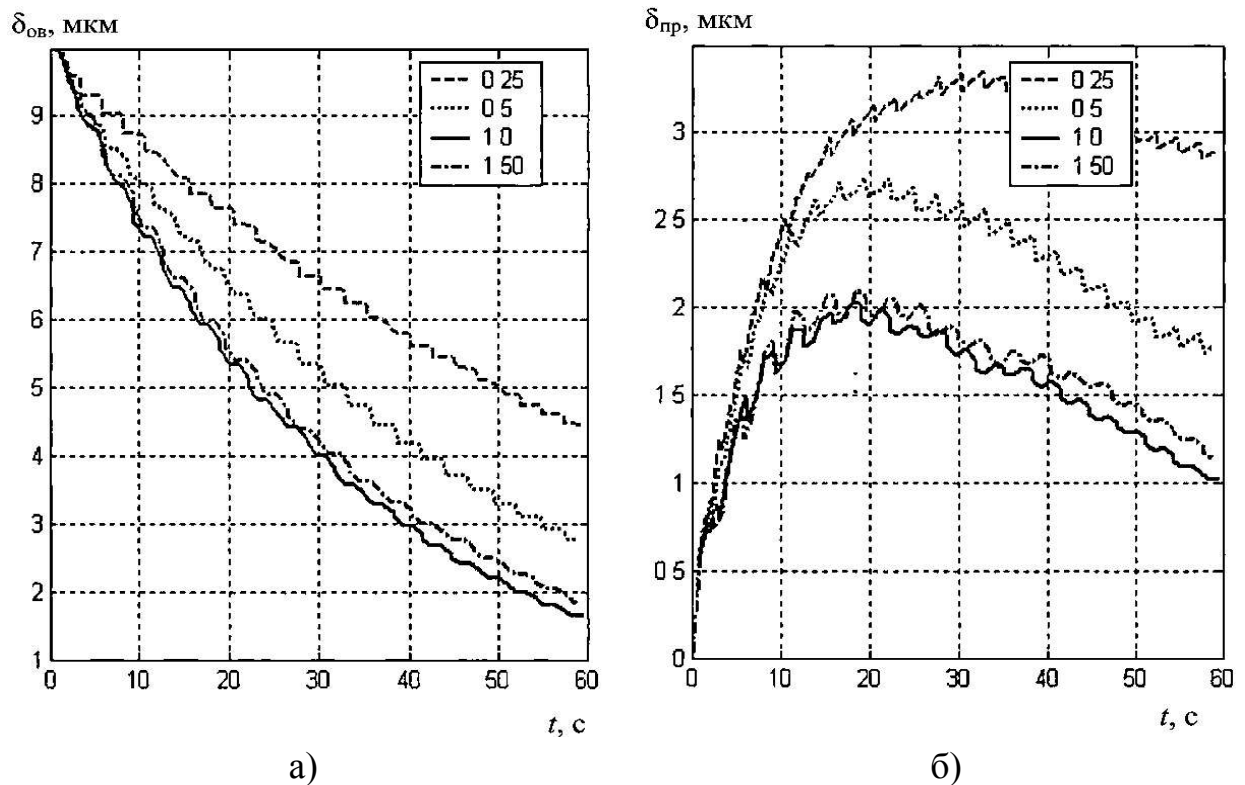


Рис. 1.12 Зависимость овальности  $\delta_{ов.}$ , (а) и отклонения профиля продольного сечения  $\delta_{пр.}$  (б) от времени  $t$  обработки и времени задержки брусков у дна отверстия:  $\tau = 0,25$  с;  $\tau = 0,5$  с;  $\tau = 1,0$  с;  $\tau = 1,25$  с

Следующий недостаток известной схемы состоит в том, что для ее реализации необходимо применение алмазных элементов, длина которых существенно меньше длины обрабатываемого отверстия. Это приводит к:

- потере производительности (меньшее число зерен участвует в резании);
- увеличению величины радиального износа (возрастает удельная нагрузка на режущие зерна) и, соответственно, снижению точности;
- уменьшению способности схемы к исправлению криволинейности оси обрабатываемого отверстия.

В отношении эффективности применения режущих элементов трапецевидной формы здесь отметим следующее.

Из исследований В.А. Огородова (рис. 1.11 б) следует, что имеет место некоторое повышение точности, однако, при этом, делается вывод, что ни одно

из известных технологических и конструкторских решений (в том числе и применение режущих элементов трапециевидной формы) не в состоянии обеспечить выполнение заданных требований к точности формы глухого отверстия при хонинговании.

С другой стороны, в результате исследований, проведенных в [5, 6, 22, 46], установлено, что имеет место не частичное повышение точности, а полное исправление конусности, и более того, получение даже обратной конусности при обработке глухих отверстий хонингованием (табл. 1.3).

Неоднозначность результатов исследований эффективности применения трапецеидальных брусков разных авторов обусловила необходимость более подробного исследования процесса хонингования такими брусками, которое приведено в третьей разделе данной работы.

Далее остановимся еще на нескольких способах хонингования, отличительной особенностью которых является то, что имеет место введение компенсационных перемещений режущих элементов в соответствии с неравномерностью их размерного износа по длине.

Первый из этих способов представлен в работе [55] и суть его заключается в том, что радиальная подача режущих элементов реализуется посредством двух идентичных разжимных конусов рис. 1.13 а (поз. 5 и 6). Каждый из разжимных конусов связан с автономным независимым приводом радиальной подачи. В процессе хонингования, при условии равенства скоростей осевого перемещения разжимных конусов, режущие элементы перемещаются только радиально. При рассогласовании скоростей осевого перемещения разжимных конусов имеет место соответствующее рассогласование скоростей радиальной подачи по длине режущих элементов. Величина и знак необходимого рассогласования скоростей определяются в соответствии с данными активного контроля текущего диаметрального размера в верхней и в нижней части хонингуемого отверстия (рис 1.13. б и в; поз. 7). Т. е., имеет место, система управления углом поворота режущих элементов с обратной связью. Эта

схема и инструмент, реализующий эту схему, предназначены для определения и последующего исправления исходной конусности хонингуемого отверстия.

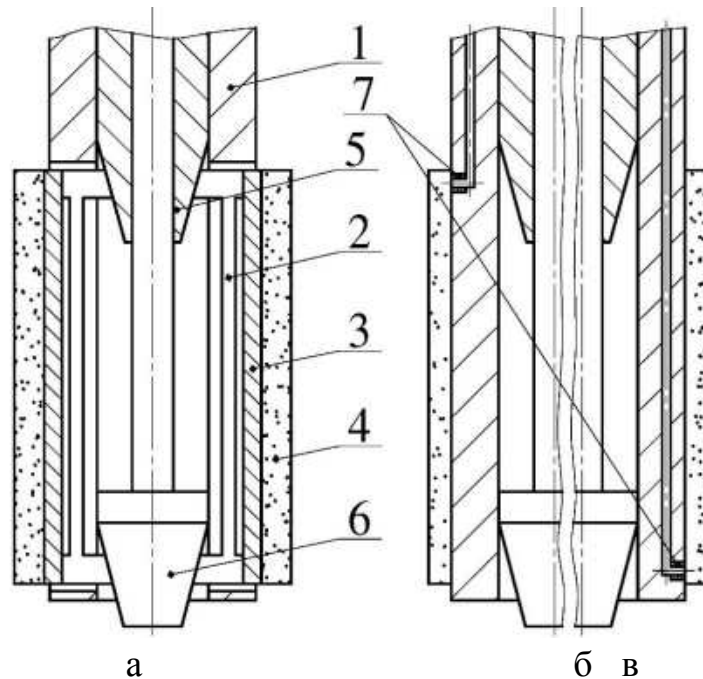


Рис. 1.13. Схема конструкции инструмента с двумя независимыми разжимными конусами

Следует заметить, что описанные выше схема и инструмент, реализующий эту схему (рис. 1.13), предназначены для хонингования сквозных отверстий, характеризующихся наличием существенно значимой исходной конусности. Порядок величин этой исходной конусности – это микроны и десятки микрон.

Если, в инструменте, выполнить соответствующую модернизацию (удлинить в нижней части колодки с алмазоносным слоем так, чтобы корпус и игла разжима не касались дна отверстия в крайнем нижнем положении инструмента), то появится возможность использования его для обработки глухих отверстий.

Если при этом за счет рассогласования скоростей радиальных подач, попытаться реализовать компенсацию не исходной конусности, а формируемой в процессе обработки по причине неравномерности размерного износа по длине режущих элементов, то, по нашему мнению, это проблематично.

Суть в том, что:



– необходимо измерять и компенсировать сравнительно малые величины, порядок которых исчисляется микронами и долями микрон, тогда, как конструкция инструмента рассчитана на существенно больший порядок величин (как указывалось выше на микроны и десятки микрон);

– радиальная жесткость разжимного конуса поз. 5 рис. 1.13 существенно ниже чем радиальная жесткость разжимного конуса поз. 6 рис. 1.13 (обусловлено конструктивным исполнением), что может привести к радиальной деформации разжимного конуса поз. 5 и заклиниванию разжимного конуса поз. 6, что, соответственно, исключит независимое перемещение разжимных конусов;

– описанный инструмент характеризуется сложностью, поскольку необходимо дополнительно конструктивно реализовать размещение в рабочей части инструмента двух независимо управляемых разжимных конусов и систему активного пневмоконтроля;

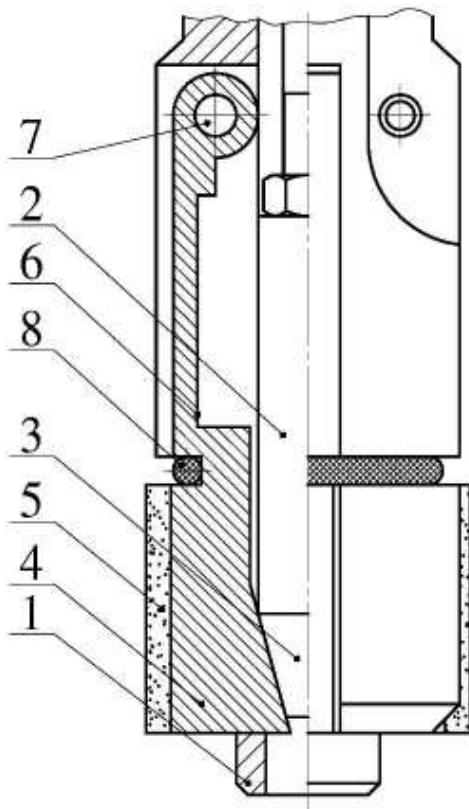


Рис. 1.14. Схема конструкции инструмента с фиксированными осями поворота режущих элементов

Изложенное предопределяет ограниченные технологические возможности инструмента и недостаточные точность обработки и надежность в процессе эксплуатации.

Другой способ, отличительной особенностью которого является то, что компенсация неравномерности размерного износа по длине режущих элементов осуществляется за счет компенсационного поворота последних вокруг неподвижных осей, представлен в работе [20].

Здесь, на рис. 1.14, представлен инструмент, реализующий этот способ. Инструмент состоит из корпуса 1, в продольных радиальных пазах которого

установлены подвижно с возможностью поворота вокруг оси 7 и контакта с рабочей частью 3 иглы разжима 2, подпружиненные пружиной 8 колодки 4 с алмазносным слоем 5. Игла разжима 2 установлена соосно корпусу с возможностью продольного перемещения посредством механизма радиальной подачи станка (на рис. не изображен). В процессе хонингования, компенсация неравномерности темпа размерного износа по длине режущих элементов осуществляется синхронно с радиальной подачи за счет поворота режущих элементов вокруг собственных фиксированных осей, который, в свою очередь, осуществляется посредством осевого перемещения иглы разжима. Здесь, с большой степенью вероятности можно предположить, что кинематика реализации радиальной подачи синхронно с компенсацией неравномерности износа по длине режущих элементов приведет к тому, что в начале процесса хонингования режущие элементы будут контактировать с обрабатываемой поверхностью своей верхней частью, а в конце обработки – нижней. Это, вследствие неравномерности износа по длине режущих элементов, может привести к формированию на рабочей части инструмента погрешности продольного сечения в виде бочкообразности, и соответственно, к формированию аналогичной погрешности в обрабатываемом отверстии. В связи с этим возникает необходимость более детального исследования эффективности применения рассматриваемого способа и инструмента. Это часть исследования представлена в разделе 4.

Следующий характерный способ хонингования глухих отверстий приведен в работе [80 88]. Для реализации этого способа применяют специальные хоны. На рис. 1.15 приведена одна из наиболее характерных конструкций такого хона. Хон оснащен двумя группами брусков, расширяющихся поочередно. Бруски первой группы закреплены на концах поворотных рычагов и расширяются при осевом перемещении среднего конуса. Бруски второй группы расширяются, как и обычно, под действием крайних конусов. Цикл хонингования начинается с обработки той части отверстия, которая прилегает к его дну. Обработку осуществляют брусками,

закрепленными на поворотных рычагах. После достижения заданного диаметра бруски первой группы сжимаются и вводят в действие бруски второй группы и хонингуют всю поверхность отверстия. При необходимости такая последовательность может быть повторена несколько раз.

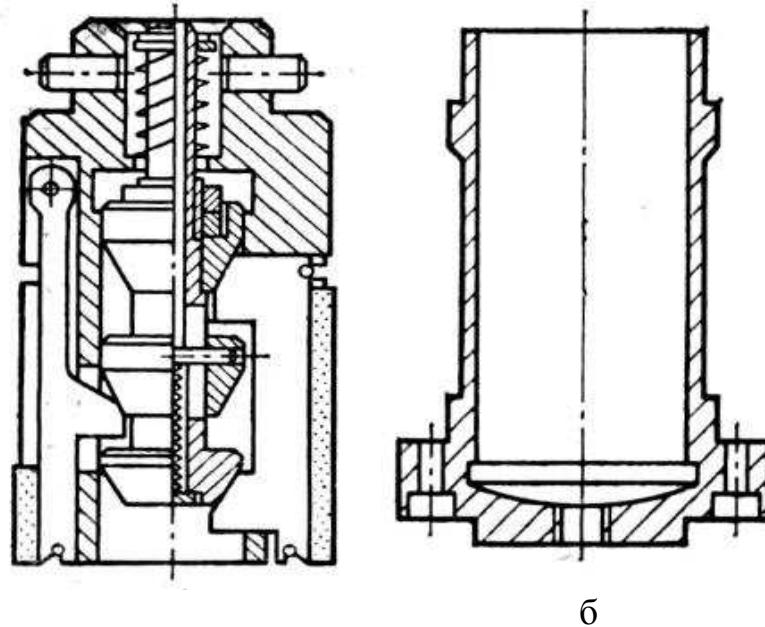


Рис. 1.15. Хон (а) с двумя группами последовательно работающих брусков для обработки деталей (б) с глухими отверстиями

Из описания конструкции и ее работы следует, что этот способ и конструкция содержат отличительные признаки, которые присутствуют в описанных выше до этого способа.

Например:

- наличие второго комплекта коротких брусков на поворотных рычагах в сочетании с первым комплектом длинных брусков дает эффект увеличения числа режущих зерен в зоне дна обрабатываемого отверстия, что эквивалентно эффекту при использовании режущих элементов трапецидальной формы (рис. 1.8);

- цикл обработки, когда имеет место вначале обработка короткими брусками в зоне дна обрабатываемого отверстия, а затем остальной частью отверстия длинными брусками, эквивалентен циклу, включающему хонингование короткими брусками на участках с минимальным диаметром (рис. 1.9);

– необходимость реализации независимой радиальной подачи двух комплектов брусков обуславливает наличие двух независимых приводов разжима, что в этом смысле, эквивалентно наличию отличительного признака в конструкции изображенной на рис. 1.13.

Из изложенного следует вывод, о том, что рассматриваемые способ и конструкция являются гибридом описанных выше способов и конструкций. Соответственно, ей присущи все достоинства и недостатки последних.

#### **1.4 Выводы по обзору. Цель и задачи исследования**

1. При конструировании деталей машин существует ограничение на применение глухих отверстий. Это связано с проблемой технологичности, и в частности, с проблемой обеспечения геометрической точности, при обработке таких отверстий.

2. Обзор технической литературы и патентных материалов показал, что разработан ряд специальных способов и технологического оснащения для повышения точности хонингования глухих отверстий.

3. На основе проведенного анализа характерных особенностей известных способов и конструкций для хонингования глухих отверстий можно сформулировать направления, по которым осуществлялись исследования и которые подлежат развитию с целью дальнейшего повышения эффективности операций хонингования глухих отверстий. Это:

- варьирование интенсивностью и временем съема припуска по длине обрабатываемого отверстия;
- формирование переменной размерной износостойкости по длине режущих элементов;
- введение компенсационных перемещений режущих элементов в соответствии с неравномерностью их размерного износа по длине.

В связи с этим целью исследования является повышение точности и эффективности обработки глухих отверстий посредством совершенствования

существующих и создания новых способов хонингования и технологического оснащения.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ механизма формирования погрешностей формы в продольном сечении на операциях хонингования отверстий.

2. Разработать математическую модель и исследовать функциональную зависимость неравномерности размерного износа по длине режущих элементов инструмента от параметров обработки.

3. Создать новые, более эффективные способы хонингования глухих отверстий и разработать технологическое оснащение для реализации этих способов.

4. Провести экспериментальную проверку теоретических положений исследования.

## РАЗДЕЛ 2.

### АНАЛИЗ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

#### 2.1 Современные представления о погрешностях формы в продольном сечении при хонинговании отверстий

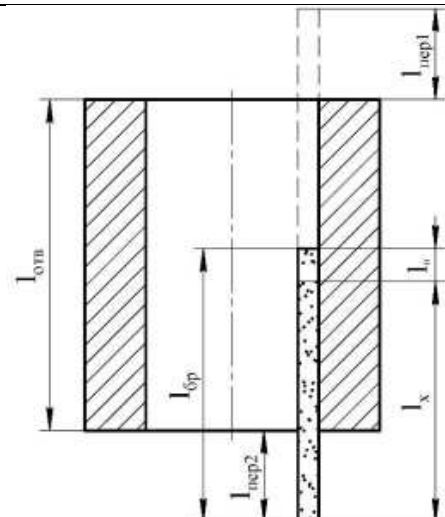
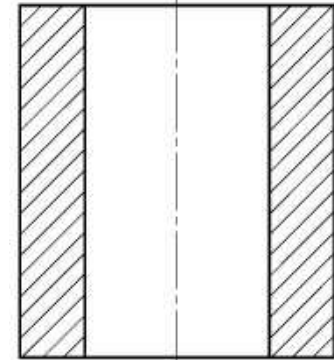
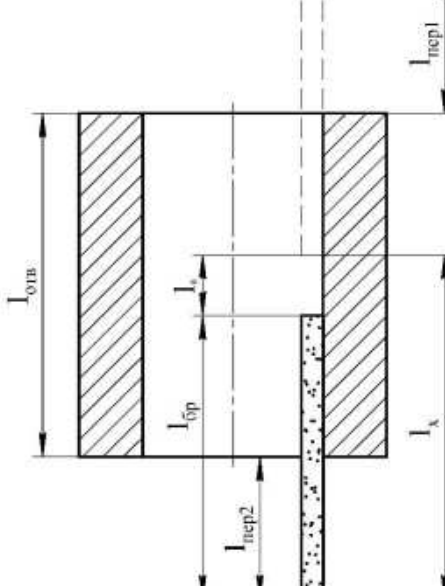
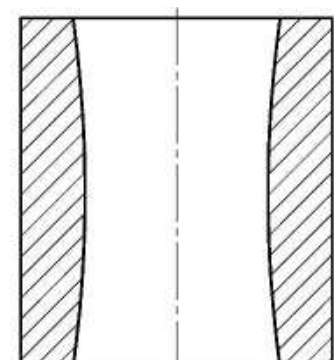
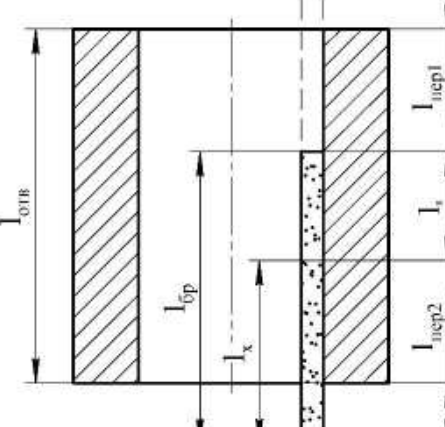
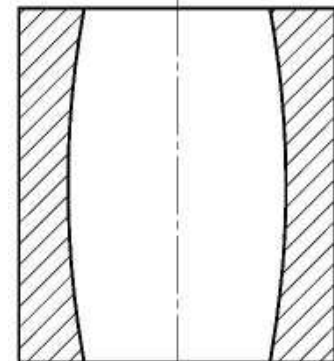
На основании практического опыта и достаточно большого объема экспериментальных исследований множества авторов Фрагин И.Е, Чеповечкий И.Х., Куликов С.И., Левин Б.Г., Кремень З.И., Бабаев С.Г., Бабичев А.П., Андреев М.В. установлены наиболее часто наблюдаемые погрешности формы обрабатываемого отверстия в продольном сечении (табл. 2.1). При этом генерирование этих погрешностей, в подавляющем большинстве случаев, функционально связывают с параметрами настройки станка, в частности, с величинами перебега.

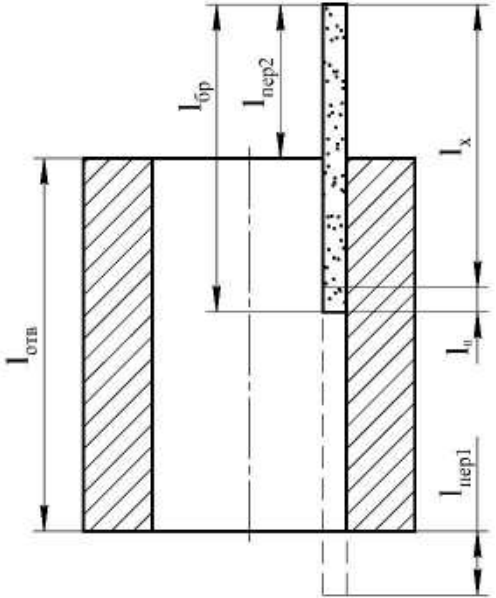
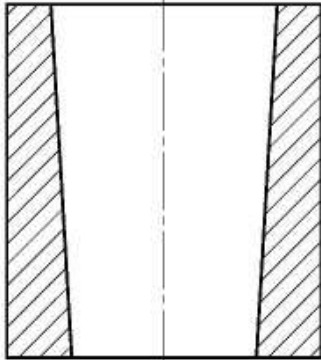
Часть авторов этих работ при этом полагают, что изначальной доминирующей причиной формирования указанных в табл. 2.1 погрешностей является податливость системы, а именно – перераспределение контактных радиальных усилий, приложенных к опорным и режущим поверхностям режущих элементов, за время одного двойного хода [42, 72, 37, 38 и др.].

Авторы ряда других работ по хонингованию [41, 70, 83, 80, 84, 68, 8, 9] и др. считают, что изначальной доминирующей причиной формирования указанных в табл. 2.1 погрешностей является неравномерный износ по длине режущих элементов. При этом, рассматриваются интегральные величины неравномерности износа.

Однако, детальное рассмотрение того, как формируются соответствующие погрешности, в этих работах, не приводится.

## Погрешности формы обрабатываемого отверстия в продольном сечении

№	Схема наладки $l_{бр} = 0,825 l_{отв}$	Форма и вид погрешности продольного сечения
1		 <p data-bbox="973 896 1372 940"><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/3 l_{бр} \approx opt</math></p>
2		<p data-bbox="1037 952 1324 996">Седлообразность</p>  <p data-bbox="973 1545 1372 1590"><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/2 l_{бр} &gt; opt</math></p>
3		<p data-bbox="1037 1601 1324 1646">Бочкообразность</p>  <p data-bbox="973 2038 1372 2083"><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/4 l_{бр} &lt; opt</math></p>

1	2	3
4		<p data-bbox="1085 201 1276 235">Конусность</p>  <p data-bbox="885 757 1476 795"><math>l_{пер1} \approx 1/4 l_{бр} &lt; opt; l_{пер2} \approx 1/2 l_{бр} &gt; opt</math></p>

Следовательно, целесообразно исследование механизма формирования погрешностей формы в продольном сечении при обработке отверстий и, особо, глухих отверстий, а также причинно-следственных связей, например, между величинами перебега и формирующейся при этом погрешности.

## 2.2. Схемы формирования погрешности формы отверстий в продольном сечении при радиальной дискретной непрерывной подаче и подаче по давлению

В табл. 2.2, в первом приближении на уровне формальной логики, представлена схема формирования погрешностей в продольном сечении обрабатываемого отверстия, если изначальной доминирующей причиной считать только перераспределение контактных радиальных усилий, воздействующие на опорные и режущие поверхности режущих элементов за время одного двойного хода.

Из таблицы 2.2 следует очевидный вывод о том, что при любых значениях перебегов неизбежно должна формироваться погрешность формы в продольном сечении в виде седлообразности, которая, по мере увеличения величин перебега – возрастает. Погрешность в виде бочкообразности здесь отсутствует.



Таблица 2.2

Схема формирования погрешностей в продольном сечении при доминировании перераспределения контактных радиальных усилий

№	Схема контактных радиальных усилий на опорных поверхностях режущих элементов	Формирующиеся погрешности обработки в продольном сечении
1		
2		<p>Седлообразность  <math>D_1' = D_1 ; D_2' &gt; D_2</math></p>
3		<p>Седлообразность  <math>D_1'' = D_1 ; D_2'' &gt; D_2' &gt; D_2</math></p>

1	2	3
4	<p><math>(l_{пер1} = l_{пер2}) &gt; \frac{1}{3} l_{бр}</math></p>	<p>Седлообразность</p> <p><math>D_1''' = D_1; D_2''' &gt; D_2' &gt; D_2' &gt; D_2</math></p>
5	<p><math>l_{пер1} &gt; \frac{1}{3} l_{бр}</math></p> <p><math>l_{пер2} &lt; \frac{1}{3} l_{бр}</math></p>	<p>Конусность (асимметричная седлообразность)</p> <p><math>D_1'''' = D_1; D_2'''' = D_2'; D_3'''' = D_2'</math></p>

В таблице 2.3. приведена схема формирования погрешностей в продольном сечении обрабатываемого отверстия, если изначальной доминирующей причиной считать неравномерность темпа износа по длине режущих элементов.

При этом имеет место следующее.

В течении периода времени, равного одному двойному ходу, параметры процесса съема припуска меняются в достаточно широких пределах, т.е. величины силового воздействия и, соответственно, радиального износа алмазоносного слоя на различных участках по длине режущих элементов неодинаковы и переменны. Более того, при различных видах и величинах

радиальной подачи, процесс съема припуска и соответственно темп и неравномерность износа по длине режущих элементов существенно отличаются.

Суть в том, что площадь контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, удельные давления по площади контакта за время одного двойного хода – циклически меняются. При этом средняя часть режущих элементов контактирует с обрабатываемой поверхностью постоянно и, соответственно, непрерывно изнашивается. Периферийные же части режущих элементов только часть времени контактируют с обрабатываемой поверхностью, а часть времени, которая соответствует времени перебега, не контактируют с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, изнашиваются, но не непрерывно, а – дискретно.

При хонинговании с радиальной подачей по давлению и с дозированной непрерывной радиальной подачей величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях инструмента примерно одинаковы. При этом правомочны следующие утверждения.

Во время поступательного перемещения инструмента нижняя часть режущего элемента становится фронтальной и интенсивнее изнашивается, чем остальные (средняя и верхняя) части режущего элемента. Во время возвратного перемещения инструмента фронтальной становится верхняя часть режущего элемента, которая аналогично более интенсивно изнашивается, чем остальные (средняя и нижняя) части режущего элемента. Т.е. при поступательном и возвратном перемещениях формируются погрешность формы инструмента в продольном сечении в виде бочкообразности (табл. 2.3 строки 4 и 5).

Однако, сформированные таким образом интенсивно изношенные фронтальные части режущих элементов в то время, когда находятся вне зоны обработки (время перебега) в процессе съема припуска не участвуют и, соответственно, не изнашиваются.

То есть, с одной стороны формируется, как указывалось выше, погрешность формы инструмента в продольном сечении в виде бочкообразности, а, с другой стороны, имеет место нивелирование этой

бочкообразности за счет отсутствия износа фронтальных частей во время перебега. Степень нивелирования определяется величиной перебега.

Отсюда следует вывод о том, что можно выбрать величину перебегов таким образом, чтобы темп износа верхней фронтальной, нижней фронтальной и средней частей режущих элементов был одинаковым, что соответствует случаю полного нивелирования темпа износа по длине режущих элементов. Тогда, изнашиваясь, инструмент постоянно будет сохранять форму предельно близкую к цилиндрической (табл. 2.3 строка 2). Соответственно и форма хонингуемого отверстия будет так же цилиндрической.

При значениях перебега больше оптимального неизбежно замедление темпа износа по краям режущих элементов по отношению к средней части, т.е. имеет место «нивелирование с избытком» в пределах разно-высотности величины внедрения режущих зерен. Это, соответственно, обуславливает формирование и достаточно длительное сохранение седлообразной формы рабочей части инструмента, которая, соответственно, переносится на обрабатываемое отверстие (табл. 2.3 строка 1).

При значениях перебега меньше оптимального неизбежен больший темп износа по краям режущих элементов по отношению к средней части, т.е. имеет место «нивелирование с недостатком». Это, соответственно, обуславливает формирование и достаточно длительное сохранение бочкообразной формы рабочей части инструмента. При этом возможны два варианта формирования профиля отверстия.

Первый вариант представлен в табл. 2.3 строка 3. Здесь величины заборных частей меньше величин перебега и, соответственно, в формировании профиля отверстия практически не участвуют. Формирование профиля отверстия осуществляется преимущественно средней цилиндрической частью режущих элементов, что обусловит, соответственно, форму отверстия близкую к цилиндрической.

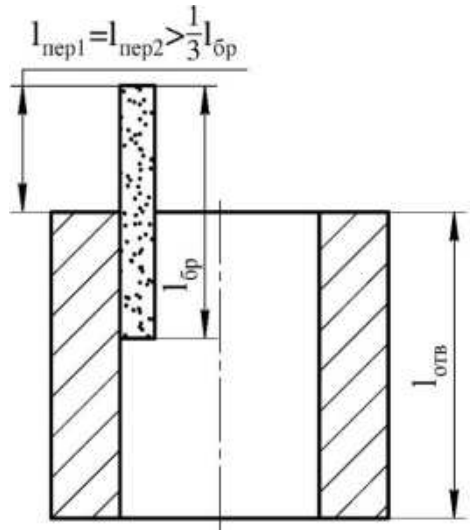
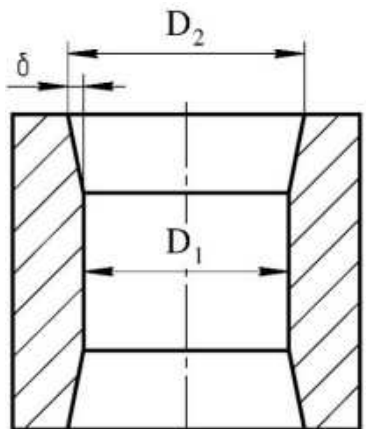
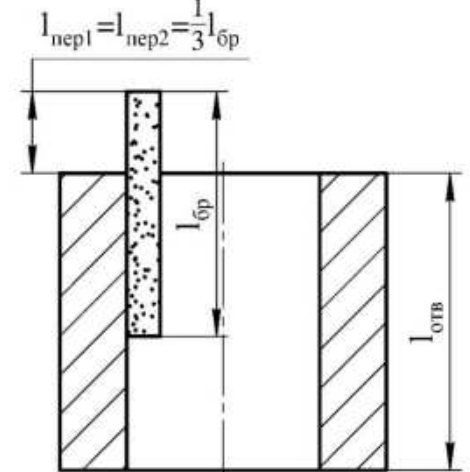
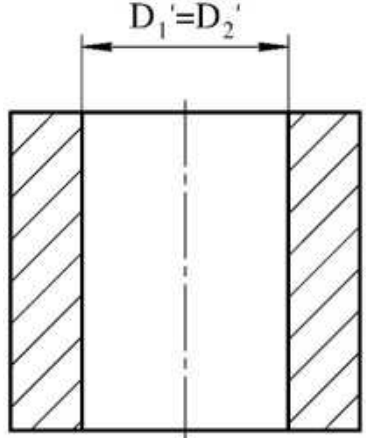
Второй вариант представлен в табл. 2.3 (строки 4 и 5). Здесь величины заборных частей больше величин перебега. В этом случае в формировании

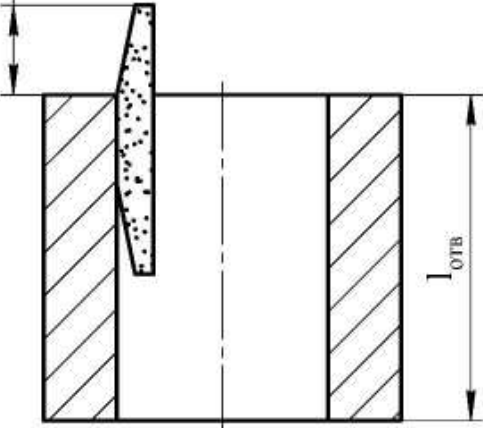
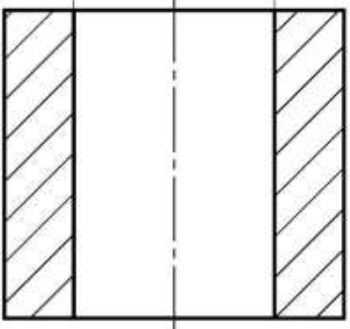
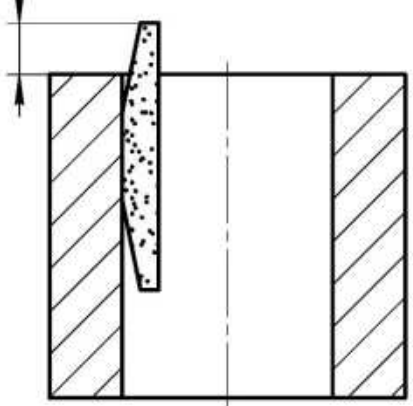
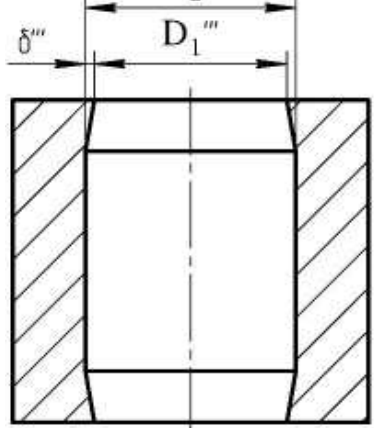
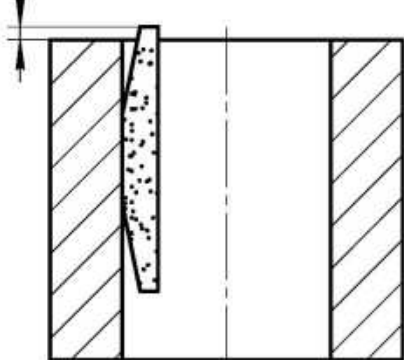
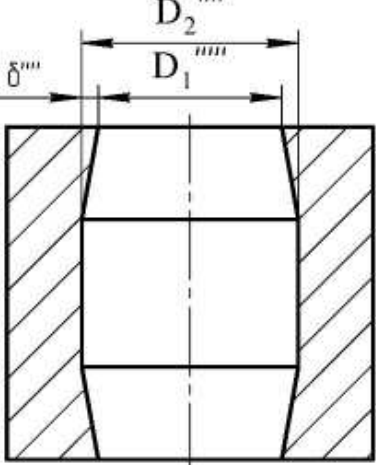
профиля отверстия участвуют средние части и частично заборные части режущих элементов. Т.е. имеет место синхронное формирование бочкообразного профиля как на рабочей части инструмента, так и в обрабатываемом отверстии.

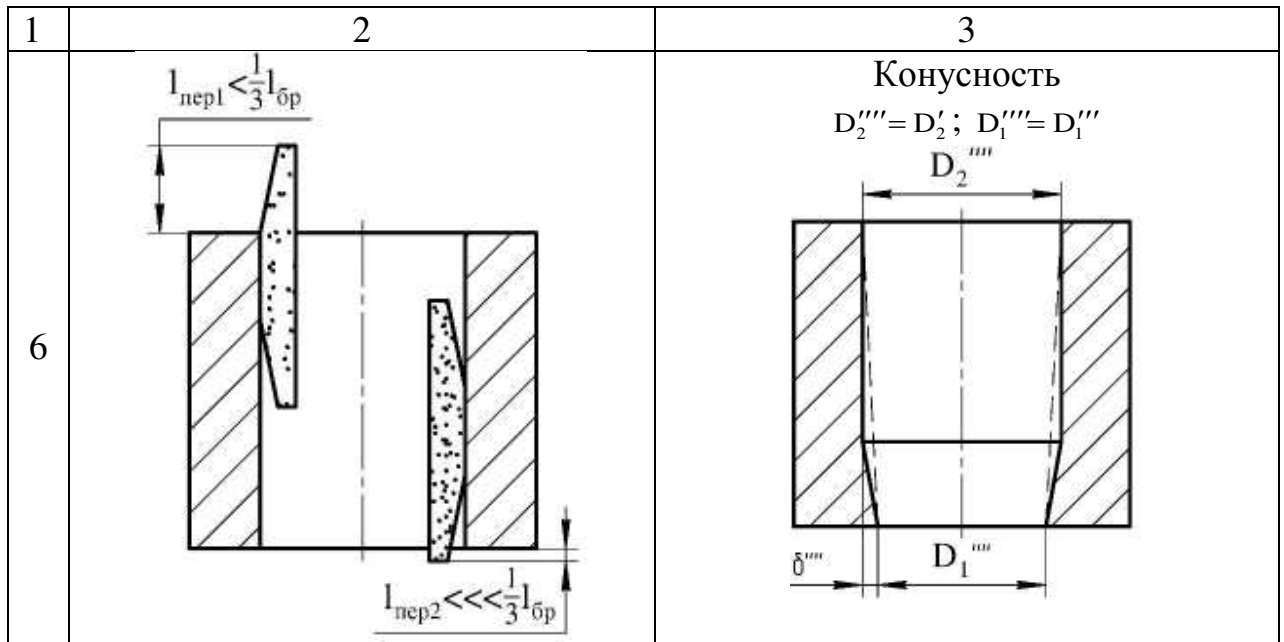
В таблице 2.3 (строка 6) представлен вариант, при котором величины перебегов существенно отличаются. Это соответственно формирует на рабочей части инструмента и в обрабатываемом отверстии ассиметричную бочкообразную форму, которая в пределе трансформируется в конусообразную форму.

Таблица 2.3

Схема формирования погрешностей в продольном сечении при доминировании неравномерности темпа износа по длине режущих элементов

№	Схема	Форма вид погрешности продольного сечения
1	<p style="text-align: center;"><math>l_{пер1} = l_{пер2} &gt; \frac{1}{3} l_{бр}</math></p> 	<p style="text-align: center;">3</p> <p style="text-align: center;">Седлообразность <math>D_2 &gt; D_2'; D_1 = D_1'</math></p> 
2	<p style="text-align: center;"><math>l_{пер1} = l_{пер2} = \frac{1}{3} l_{бр}</math></p> 	<p style="text-align: center;"><math>D_1' = D_2'</math></p> 

1	2	3
3	$(l_{\text{пер1}} = l_{\text{пер2}}) < \frac{1}{3} l_{\text{бр}}$ 	$D_2'' = D_2'; D_1'' = D_1'$ $D_1'' = D_2''$ 
4	$(l_{\text{пер1}} = l_{\text{пер2}}) \ll \frac{1}{3} l_{\text{бр}}$ 	<p>Бочкообразность</p> $D_2''' = D_2'; D_1''' < D_1'$ $D_2'''$ $\delta'''$ $D_1'''$ 
5	$(l_{\text{пер1}} = l_{\text{пер2}}) \ll \ll \frac{1}{3} l_{\text{бр}}$ 	<p>Бочкообразность</p> $D_2'''' = D_2'; D_1'''' < D_1''' < D_1'' < D_1'$ $D_2''''$ $\delta''''$ $D_1''''$ 



Сравнивая виды погрешностей в табл. 2.2 с погрешностями в табл. 2.1 видим, что при идентичных видах перебегов формирующиеся погрешности не идентичны и, более того, в табл. 2.2. погрешность формы в продольном сечении в виде бочкообразности – отсутствует, т.е. имеет место логическое противоречие.

Если же сравнить виды погрешностей в табл. 2.3 с погрешностями в табл. 2.1 видим, что при идентичных видах перебегов формирующиеся погрешности в большей степени совпадают, чем при сравнении погрешностей в табл. 2.2 и 2.1. кроме того, здесь имеет место как бочкообразность, так и седлообразность, т.е. упомянутое выше логическое противоречие отсутствует.

Нетрудно понять, что, суммируя соответствующие идентичным перебегам погрешности в табл. 2.2 и 2.3, получим результирующую погрешность близкую к форме погрешности в табл. 2.1.

Таким образом, на этом этапе рассмотрения, можно сделать основополагающий вывод о том, что форма генерируемой погрешности на операциях хонингования определяется двумя встречно направленными факторами, а именно: неравномерностью износа по длине режущих элементов и радиальной жесткостью рабочей части инструмента, при чем из этих двух факторов существенно более весомым является фактор износа. При этом:

- при сравнительно малых величинах перебегов доминирующим фактором становится неравномерный износ по длине режущих элементов инструмента (доминирует форма погрешности в виде бочкообразности);
- при сравнительно больших величинах перебегов доминирующим фактором становится неравномерность жесткости по длине режущих элементов инструмента (доминирует форма погрешности в виде седлообразности);
- при оптимальных величинах перебегов действие этих двух факторов суммируется и, соответственно, формируемая погрешность минимизируется;
- при ассиметричных нижнем и верхнем перебегах генерируется ассиметричная погрешность, близкая к конусообразности. При этом, увеличение диаметрального размера конуса направлено в сторону большего перебега.

Далее, в следующей параграфе перейдем к схемам формирования погрешностей формы отверстий в продольном сечении при дискретной дозированной радиальной подаче.

### **2.3. Схемы формирования погрешности формы отверстий в продольном сечении при дискретной дозированной радиальной подаче**

В настоящее время, операции хонингования с радиальной подачей по давлению и непрерывной дозированной радиальной подачей применяется крайне редко по различным причинам. Существенно большее применение получила схема хонингования с дискретной дозированной радиальной подачей.

Дискретная дозированной радиальной подачей в современных станках реализуется в момент реверса возвратного перемещения инструмента на поступательное, т.е. – в крайнем верхнем положении инструмента.

В предыдущем параграфе отмечалось, что в случае хонингования с подачей по давлению и дозированной непрерывной подачей, величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях одинаковы. Соответственно, величины износа общего и фронтальных частей при



поступательном и возвратном перемещениях, при хонинговании сквозных отверстий, будут зеркально одинаковыми (табл. 2.4 строка 1).

В случае хонингования сквозных отверстий с дозированной дискретной радиальной подачей, величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях (в отличие от хонингования с подачей по давлению и дозированной непрерывной подачей), существенно отличаются. Большая часть припуска удаляется при поступательном перемещении (процесс интенсивного резания), а меньшая часть – при возвратном (процесс выхаживания) (табл. 2.4 строка 3). Это неравенство удаляемых припусков обуславливает асимметричность износа заборных частей режущих элементов по длине. Последнее, в свою очередь, обуславливает соответствующее формирование погрешности в виде конусности в обрабатываемом отверстии.

Очевидным, в данном случае, является то, что эту погрешность можно устранить, например, за счет увеличения величины нижнего перебега по отношению к верхнему (табл. 2.4 строка 4).

В случае хонингования, с подачей по давлению и дозированной непрерывной подачей глухих отверстий, величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях одинаковы, однако, величины износа фронтальных частей при поступательном и возвратном перемещениях будут ассиметричными (табл. 2.4 строка 2) по причине асимметричности верхнего и нижнего перебегов. Указанная асимметричность износа режущих элементов по длине служит, как указывалось ранее, причиной формирования погрешности в виде конусности (табл. 2.3 строка 6).

При хонинговании глухих отверстий с дозированной дискретной радиальной подачей также присутствует механизм генерирования погрешности формы в продольном сечении в виде конусности. Но в этом случае, скорость генерирования этой погрешности будет существенно выше связи с тем, что имеет место суммирование погрешностей, обусловленных как асимметрией величин перебега, так и асимметрией величин снимаемых припусков (табл. 2.4 строка 5).

Табл. 2.4

Схемы съема припусков за один двойной ход при различных видах радиальной подачи

№	Схема съема припуска при поступательном перемещении	Схема съема припуска при возвратном перемещении	Форма генерируемой погрешности
1	2	3	4
При подаче по давлению			
1			
2			

1	2	3	4
При дискретной дозированной подаче			
3			
4			
5			

## 2.4. Выводы по второму разделу

1. В результате проведенного анализа установлено, что из множества причин основными причинами формирования погрешности профиля в продольном сечении при хонинговании отверстий являются неравномерность износа по длине режущих элементов и переменная контактная жесткость по длине рабочей части инструмента.

При этом установлено, что из этих двух основных причин доминирующей причиной формирования погрешности профиля в продольном сечении при хонинговании отверстий является неравномерность износа по длине режущих элементов.

2. При обработке глухих отверстий с дозированной непрерывной подачей и подачей по давлению отсутствует возможность обеспечения оптимальной величины перебега в зоне дна обрабатываемого отверстия (асимметрия перебегов), а при обработке с дозированной дискретной подачей – асимметрия перебегов плюс асимметрия величин удаляемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях инструмента.

Это приводит к тому, что имеет место накопительная неравномерность износа режущих элементов по их длине. Т.е. на рабочей части инструмента формируется накопительная геометрическая погрешность в виде конусности, которая обуславливает генерирование аналогичной накопительной погрешности на хонингуемом отверстии детали.

### РАЗДЕЛ 3.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ПО ДЛИНЕ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

Известно, что степень износа режущих элементов и величина съёма припуска функционально связаны через величину удельного износа режущих элементов. Следовательно, можно утверждать, что величина удельного износа произвольного элементарного участка по длине режущего элемента пропорциональна, с одной стороны, удельной величине удаленного припуска, а с другой стороны, эквивалентной элементарной работе совершаемой этим участком по удалению этого припуска. Исходя из этого, запишем [33]

$$U = \eta \cdot A = \eta \cdot \int_0^{t_y} P \cdot V dt \quad (3.1)$$

где:  $\eta$  – коэффициент пропорциональности;

$A$  – работа, совершаемая элементарным участком по длине режущего элемента;

$P$  – значение силы резания в направлении перемещения режущих зерен;

$V$  – скорость резания;

$t$  – текущее время;

$t_{ц}$  – период времени одного двойного хода инструмента.

Далее, в следующих параграфах, определим выражение для  $V$  и  $P$  в (3.1).

Предварительно отметим, что при написании выражений для  $V$  и  $P$  воспользуемся одним из приемов методологии теории обобщённых функций [33].

Суть в следующем.

Перечень известных классов элементарных функций (простых, либо сложных) записывают в виде предельного перехода с устремлением к пределу соответствующего [24] (– их) параметра (– ов) этой (– их) функции (–ий). Сама запись каждого класса функции в таком виде является аналитическим обобщённым уравнением. Если построить графики этих обобщённых уравнений,

то получим семейство «нестандартных» графиков, представляющих собой либо графики в виде ломаных линий, либо графики в виде линий с разрывами и т.д. Из этого семейства всегда можно выбрать какой-то один график, который по форме соответствует искомому.

### **3.1 Уравнение скорости возвратно-поступательного перемещения режущих элементов инструмента**

В технической литературе [42] кинематика процесса хонингования рассматривается как совокупность трех относительных перемещений режущих элементов инструмента и детали: возвратно-поступательного, вращательного и радиального. При этом, возвратно-поступательное перемещение реализуется, в подавляющем большинстве случаев гидроприводом. Скорость этого перемещения, по умолчанию, рассматривается только в периоды установившегося режима движения и принимается постоянной величиной. При таком рассмотрении, в самом общем виде, схематично, упрощенный график скорости возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали, будет иметь вид, представленный на рис.3.1 а. Более точный график закона изменения скорости возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали приведен в автореферате диссертации [69]. Вид этого графика представляет собой ломаную линию и, здесь, изображен на рисунке 3.1 б. Прямолинейный участок между точками  $M$  и  $N$  на этом графике соответствует времени реверса. Очевидно, что, график на рис. 3.1 б может быть трансформирован в еще более точный, если скорректировать. Выполним сглаживание в точках  $M$  и  $N$  т.е. заменим прямолинейный участок между точками на плавно изменяющийся нелинейный (рис. 3.1 в).

В таком виде, график на рис. 1в по отношению к графикам на рис 1а и 1б является более близким к реальному закону изменения скорости возвратно-поступательного перемещения исполнительного органа станка (шпиндельной бабки), реализуемого гидроприводом. Заметим, что при таком видоизменении

графиков для упрощения исключена из рассмотрения стохастическая составляющая инерционных процессов в моменты реверса [3].

Если исходить из вида графиков на рис. 3.1, то для достижения поставленной цели, целесообразно воспользоваться одним из приемов методологии теории обобщённых функций. Суть в следующем.

Перечень известных классов элементарных функций (простых, либо сложных) записывают в виде предельного перехода с устремлением к пределу соответствующего (– их) параметра (– ов) этой (– их) функции (– ий). Сама запись каждого класса функции в таком виде является аналитическим обобщённым уравнением. Если построить графики этих обобщенных уравнений, то получим семейство «нестандартных» графиков, представляющих собой либо графики в виде ломаных линий, либо графики в виде линий с разрывами и т.д. Из этого семейства всегда можно выбрать какой-то один график, который по форме соответствует искомому.

С учётом изложенного наиболее подходящим математическим выражением для графиков на рис. 3.1 а и в является предел элементарной синусоидальной функции в степени  $\frac{1}{2n-1}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), при  $n \rightarrow k$

$$\lim_{n \rightarrow k} y = \lim_{n \rightarrow k} A \cdot (\sin \omega t)^{\frac{1}{2n-1}}, \text{ или } y = A \cdot (\sin \omega t)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (3.2)$$

Графиком функции (3.2) при  $n = k = 1$  является синусоида (рис. 3.2 а).

Если же устремить  $n$  до бесконечности ( $n = k = +\infty$ ), то показатель степени устремится к нулю, а любое значение функции  $\sin(\omega t)$  в нулевой степени равно единице, то есть график выражения (2) примет вид изображённого на рис. 3.2 б.

Если принять

$$A = V_{\sigma.}^{\text{табл.}} = V_{n.}^{\text{табл.}} = V_{\sigma.n.}^{\text{табл.}} = 1; T_y = \omega t_0 = 2\pi; \omega = 1; T_y = t_0 = 2\pi \quad (3)$$

то график, изображенный на рис 3.1а., совпадет с графиком, изображенным на рис. 3.2 б как по форме, так и по амплитуде и периоду. В этом случае все дальнейшие математические преобразования выражения (3.2) будут одинаково справедливыми для графиков, приведенных на обоих рисунках.

Далее, непосредственной подстановкой возрастающих значений  $n$  в выражение (3.2), можно убедиться, что синусоидальный график (рис. 3.2а) будет видоизменяться (соответственно графики рис. 3.2 в), приближаясь к виду графика 3 на рис 3.1 в и далее к виду графика 3.2 б, либо 3.1 а.

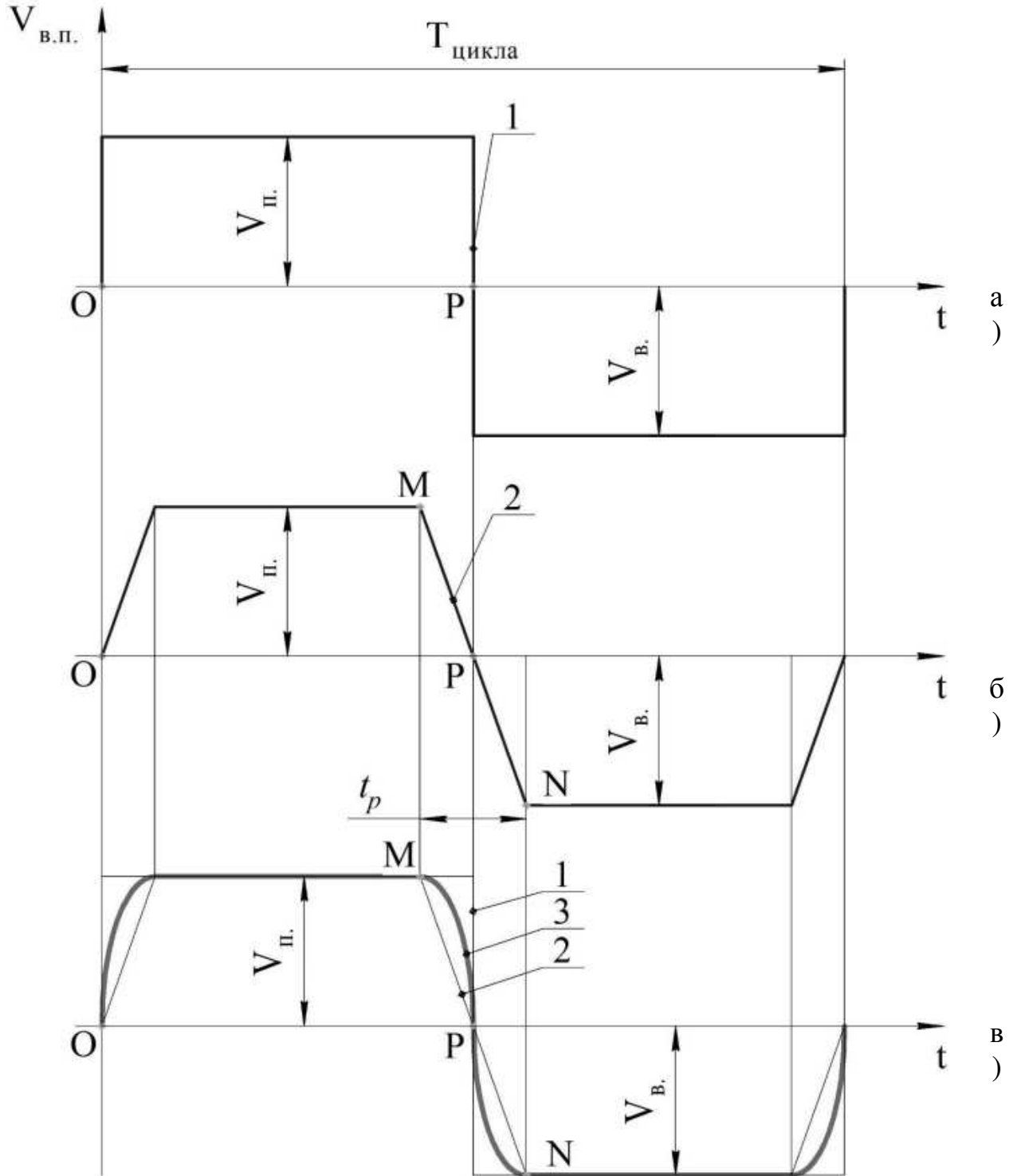


Рис. 3.1 График скорости возвратно поступательного перемещения: а) без учета времени реверса; б) с учетом времени реверса и при условии скачкообразного изменения скорости; в) с учетом времени реверса и при условии плавного изменения скорости



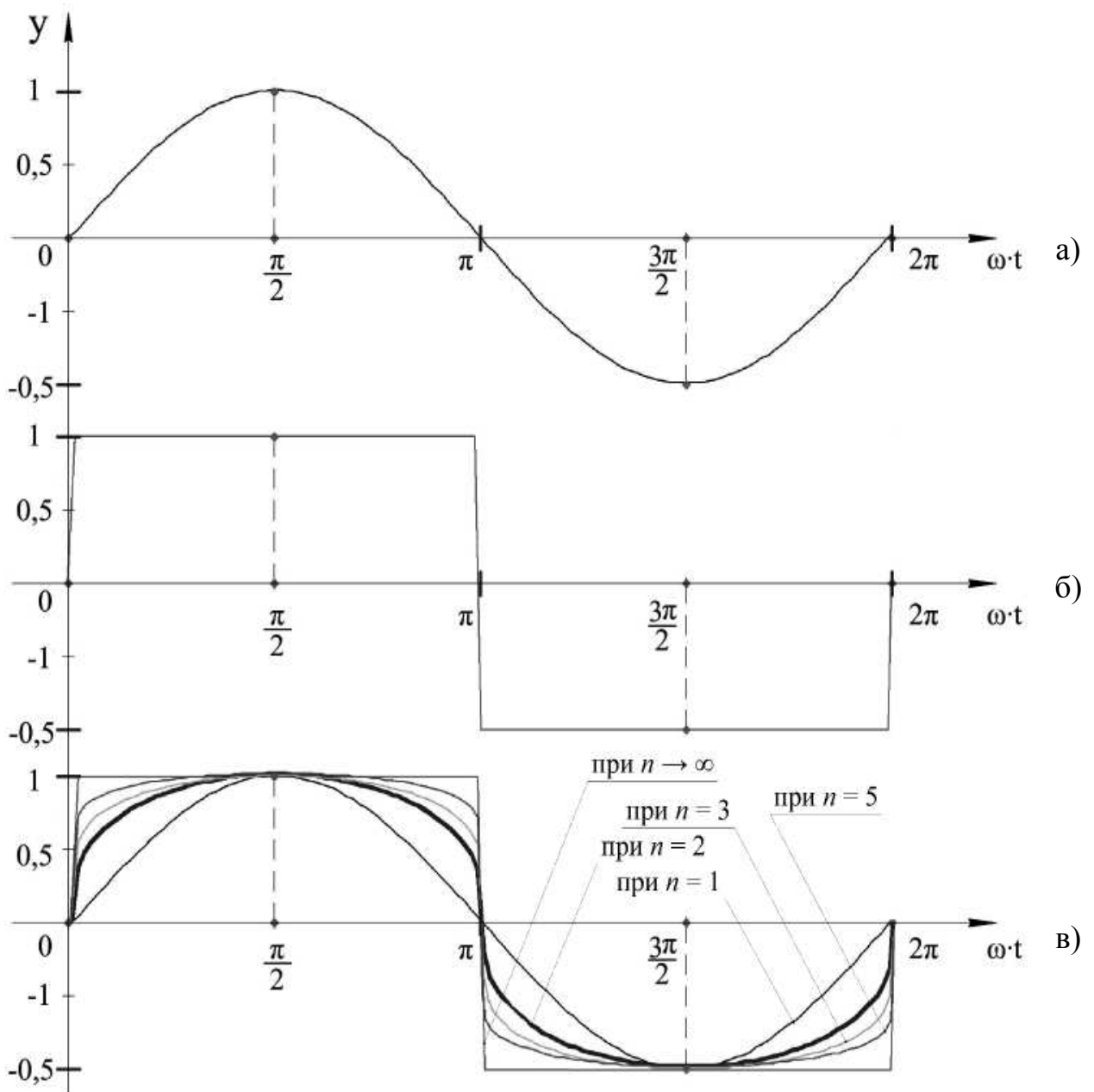


Рис. 3.2 Графики функции (3.2)

Естественно, также, утверждать, что при возрастании  $n$ , величина площади ограниченной осью абсцисс и положительной ветвью видоизменяющейся синусоиды будет возрастать, приближаясь к величине площади под положительной ветвью графика 3 на рис. 3.1.в, и при каком-то значении  $n$  величины этих площадей максимально приблизятся и практически станут равными. В этом случае эти графики станут взаимозаменяемыми. Это утверждение правомочно в том случае, если множество графиков 3 на рис. 3.1.в.

конкретизировать, например, условием равенства площади под положительной ветвью графика 3 на рис. 3.1.в половине суммы площадей соответственно под положительными ветвями графиков на рис. 3.1а и 3.1б, т. е.,

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \omega t)^{\frac{1}{2n-1}} d\omega t = \frac{[\pi] + [\pi + (\pi - t_r \omega)]/2}{4} = \frac{4\pi - t_r \omega}{8} \quad (3.4)$$

Произведя замену переменной и пределов интегрирования  $\sin(\omega t) = z$ ;  
 $dz = \cos(\omega t) \cdot d(\omega t)$  ( $z_{н} = 0$ ;  $z_{г} = 1$ ) и с учетом равенства  
 $d(\omega t) = \frac{dz}{\cos(\omega t)} = \frac{dz}{\sqrt{1 - \sin^2(\omega t)}} = \frac{dz}{\sqrt{1 - z^2}}$

перепишем (3.4) следующим образом

$$\int_0^1 z^{\frac{1}{2n-1}} \frac{dz}{\sqrt{1 - z^2}} = \frac{4\pi - t_r \omega}{8} \quad (3.5)$$

Заменяем выражение  $\frac{1}{\sqrt{1 - z^2}}$  в (3.5) его разложением в ряд Маклорена

$$\begin{aligned} & \int_0^1 z^{\frac{1}{2n-1}} \left( 1 + \frac{1}{2} z^2 + \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2}}{1 \cdot 2} z^4 + \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{5}{2}}{1 \cdot 2 \cdot 3} z^6 + \dots \right) dz = \int_0^1 z^{\frac{1}{2n-1}} \left( 1 + \frac{1}{2^1 \cdot 1!} z^2 + \frac{1 \cdot 3}{2^2 \cdot 2!} z^4 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 \cdot 3!} z^6 + \dots \right) dz = \\ & = \int_0^1 z^{\frac{1}{2n-1}} \left( 1 + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot z^{2i} \right) dz = \int_0^1 z^{\frac{1}{2n-1}} dz + \int_0^1 \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot z^{2i + \frac{1}{2n-1}} dz = \\ & \frac{2n-1}{2n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot \frac{2n-1}{4in - 2i + 2n} = \frac{4\pi - t_r \cdot \omega}{8} \end{aligned}$$

или

$$\frac{2n-1}{n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)!!}{2^i \cdot i!} \cdot \frac{2n-1}{i(2n-1)+n} = \frac{4\pi - t_r \cdot \omega}{4}, \quad (3.6)$$

где:  $k$  – принятое конечное число слагаемых рассматриваемого ряда;

из записи  $(2i - 1)!!$  – следует, что из каждого слагаемого произведений ряда натуральных целых чисел исключаются четные числа, т.е. операция умножения реализуется только для ряда целых нечетных чисел. Для удобства вычислений запишем уравнение, эквивалентное уравнению (3.6), в котором отсутствует двойной факториал:

$$\frac{2n-1}{n} + \sum_{i=1}^{k \rightarrow \infty} \frac{(2i-1)! \cdot i}{2^{2i-1} \cdot (i!)^2} \cdot \frac{2n-1}{i(2n-1)+n} = \frac{4\pi - t_r \cdot \omega}{4}. \quad (3.7)$$

Корень выражения (3.7) является искомым значением  $n$ , точность определения которого функционально зависит от значения  $k$  и  $t_r \cdot \omega$ .

Чем больше значение  $k$ , тем точнее искомое значение  $n$ .

Значение  $\omega$ , применительно к процессу хонингования, численно равно числу двойных ходов инструмента в единицу времени и может быть определено из равенства:

$$\omega = 2\pi \frac{V_{в.н.}^{cp.}}{2l_x} = \frac{\pi \cdot V_{в.н.}^{cp.}}{l_o - l_{op} + l_1 + l_2}, \quad (3.8)$$

где:  $V_{в.н.}^{cp.}$  и  $l_x$  – соответственно средняя скорость и амплитуда возвратно-поступательного перемещения инструмента относительно детали;

$l_o$  и  $l_{op}$  – соответственно длины хонингуемого отверстия и режущих элементов (брусков);

$l_1$  и  $l_2$  – соответственно длина верхнего и нижнего перебега инструмента.

Для определения приближенного значения  $V_{в.н.}^{cp.}$  воспользуемся условием аналогичным условию, принятому при написании выражения (3.4). Примем  $V_{в.н.}^{cp.}$  равным произведению  $V_{в.н.}^{табл.}$  на коэффициент, значение которого определим, как отношение усредненного значения площадей под графиками 1, 2 (рис. 3.1в.) к значению площади под графиком 3.1, или, иначе, как отношение площади под графиком 3 к площади под графиком 1 (рис. 3.1в.).

$$V_{в.н.}^{cp.} = V_{в.н.}^{табл.} \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot t_r}{4\pi}\right). \quad (3.9)$$

Подставляя значение  $V_{в.н.}^{cp.}$  из (9) в (8) и решая относительно  $\omega$ , получим

$$\omega = \frac{4\pi \cdot V_{в.н.}^{табл.}}{4 \cdot l_x + V_{в.н.}^{табл.} \cdot t_r} \quad (3.10)$$

$$\text{или } \omega = \frac{4\pi \cdot V_{в.н.}^{табл.}}{4 \cdot (l_o - l_{op} + l_1 + l_2) + V_{в.н.}^{табл.} \cdot t_r}$$

Подставляя значение  $\omega$  из (3.10) в (3.2) с учетом фиксированного значения  $n$ , определенного, как корень уравнения (3.7), получим

$$V_{\text{в.н.}} = V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot \left( \sin \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t}{4 \cdot l_x + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r} \right)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (3.11)$$

или

$$V_{\text{в.н.}} = V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot \left( \sin \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t}{4 \cdot (l_\delta - l_\delta + l_1 + l_2) + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r} \right)^{\frac{1}{2n-1}} \quad (3.12)$$

Полная скорость при хонинговании

$$V = \sqrt{V_{\text{в.н.}}^2 + V_{\text{вп.}}^2}, \quad (3.13)$$

где: –  $V_{\text{вп.}}$  – окружная скорость инструмента относительно детали (в данном исследовании  $V_{\text{вп.}} = \text{const}$ ).

Подставляя (3.12) в (3.13), получим

$$V = \sqrt{\left( V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \right)^2 \cdot \left( \sin \frac{4\pi \cdot V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t}{4 \cdot (l_\delta - l_\delta + l_1 + l_2) + V_{\text{в.н.}}^{\text{табл.}} \cdot t_r} \right)^{\frac{2}{2n-1}} + V_{\text{вп.}}^2} \quad (3.14)$$

### Выводы.

1. Получено математическое выражение закона изменения скорости возвратно-поступательного перемещения исполнительных органов станков с гидравлическим приводом.

2. Это математическое выражение может быть использовано для исследования условий протекания процессов обработки (например, динамики процессов формирования регулярного рельефа, качества поверхности, износа инструмента, формирования погрешности обработки и т.д.).

## 3.2 Уравнение распределения усилий по длине режущих элементов инструмента

Ранее отмечалось, что характерной особенностью контактирования режущих элементов с хонингуемой поверхностью за время одного двойного хода является следующее.

1. Средняя часть режущих элементов, соответствующая величине  $l_\delta - l_1 - l_2$  контактирует с обрабатываемой поверхностью постоянно и, соответственно,

время контактирования этой части численно равно времени одного двойного хода инструмента относительно детали.

2. Верхние и нижние части режущих элементов, которые по длине равны, соответственно, длине верхнего перебега  $l_1$  и длине нижнего перебега  $l_2$ , контактируют с обрабатываемой поверхностью дискретно. При этом, время контактирования каждого элементарного участка режущей поверхности по длине  $l_1$  и  $l_2$  различно и возрастает в направлении от периферии к середине режущих элементов.

Из пунктов 1 и 2 следует, что имеет место переменность площади контакта режущего элемента с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, переменность во времени удельных усилий по длине контактирования.

3. При поступательном перемещении режущих элементов их нижняя часть становится фронтальной, а верхняя – тыльной, и наоборот, при возвратном перемещении режущих элементов их верхняя часть становится фронтальной, а нижняя – тыльной. Соответственно, та часть, которая функционально является фронтальной существенно более нагружена, чем тыльная и, соответственно, в момент реверса, происходит зеркальное изменение ориентации эпюры удельных усилий. Следовательно, при реверсе мгновенные значения усилий на эпюре, в какой-то момент времени становятся равными.

4. При подаче по давлению и дозированной непрерывной подаче, величины удаляемого припуска, и, соответственно, значения усилия при поступательном  $P_{\text{рад.уд.}}^{\text{ср.пост}}$  и возвратном  $P_{\text{рад.уд.}}^{\text{ср.возв}}$  перемещениях, одинаковы. При дозированной же дискретной подаче, которая реализуется в крайнем верхнем положении инструмента, интенсивность съема припуска при поступательном перемещении существенно выше, чем при возвратном. Соответственно и значения усилий за время поступательного перемещения существенно больше, чем при возвратном.

5. Удельные усилия по длине режущих элементов также зависят от:

– режимов обработки, с интенсификацией которых возрастают абсолютные значения сил резания;

- свойств обрабатываемого материала и исходного состояния поверхности обрабатываемого отверстия;
- режущих свойств рабочей части инструмента;
- применяемой СОТС и т.д.

Дать математическое описание влияния каждого из этих факторов и их совместного влияния на вид распределения усилий по длине режущих элементов – задача крайне сложная. В связи с этим, в данном исследовании, целесообразно ввести усредненное эквивалентное значение величины удельного усилия. Это значение, в самом общем виде для различных радиальных подач будет отличаться. В частности, при подаче по давлению и дозированной непрерывной радиальной подаче

$$P_{рад.уд.}^{cp} = \frac{P_p}{B \cdot z \cdot l_{\sigma}^k} = \frac{P_p}{B \cdot z \cdot (l_{\sigma} - l_{пер} + x)} = P(S_{рад}); \quad (3.15)$$

где:  $P_p$ ,  $P(S_{рад})$  – соответственно усилие прижима режущего элемента к обрабатываемой поверхности ( $P - const$ ) и удельное усилие, определяемое скоростью радиальной подачи (табл. 19 [49]);

$B$  – ширина режущих элементов;

$z$  – число режущих элементов;

$l_{\sigma}^k$  и  $l_{пер}$  соответственно текущее значение длины контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью и величина перебегов, соответствующих времени контактирования элементарных участков по длине режущих элементов за один двойной ход.

На рис. 3.3 приведена схема контактирования режущих элементов с хонингуемой поверхностью за время одного двойного хода и соответствующие формальные графики изменения радиальных сил во времени и по длине режущих элементов.

Необходимо записать математическое выражение, эквивалентное графикам на рис. 3.3 д. При этом, целесообразно использовать те же приемы и допущения, что и в параграфе 3.1. Здесь, в качестве исходной, примем функцию косинуса

$$\lim_{n \rightarrow k} y = \lim_{n \rightarrow k} A \cdot (\cos \omega t)^{\frac{1}{2n-1}}, \quad (3.16)$$

графики которой при  $n = k = 1$  и  $n = k = 300$  (корню уравнения (3.7)) приведены на рис. 3.4.

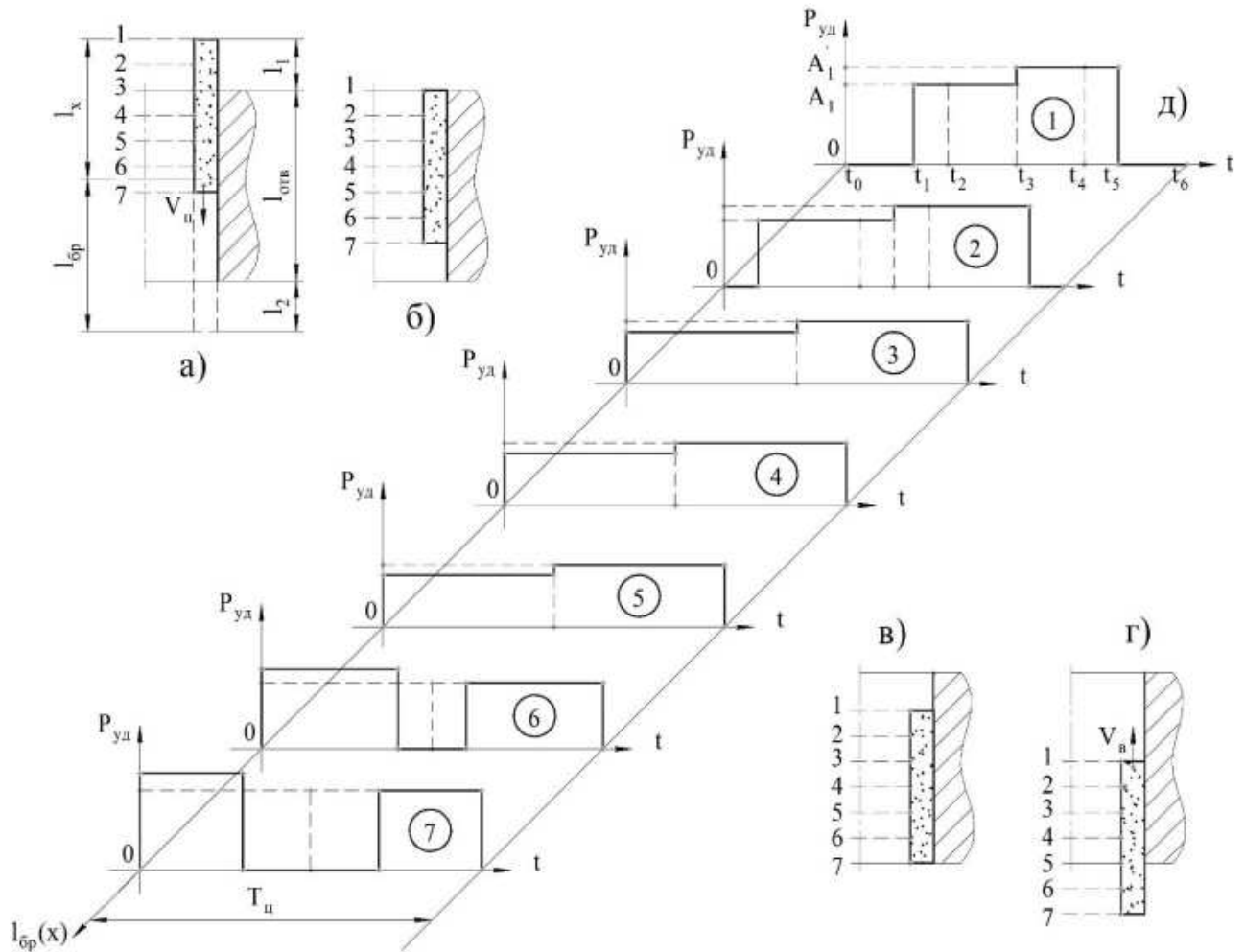


Рис. 3.3. Графики изменения радиального усилия резания в семи фиксированных и равноудаленных друг от друга по длине режущего элемента точках (д) и схемы взаимного расположения (контактирования) режущего элемента и обрабатываемой поверхности за время одного двойного хода (а, б, в и г).

Если переместить ломанный график на рис. 3.4 соответственно по оси абсцисс на величину  $t_u/2$ , а по оси ординат – на единицу и при этом значение ординаты графика уменьшить в два раза, то уравнение (16) изменится следующим образом

$$y = \frac{A}{2} \left\{ 1 + \left[ \cos \omega \left( t - \frac{t_y}{2} \right) \right]^{2n-1} \right\} \quad (3.17)$$

и, соответственно, график на рис. 3.4 трансформируется в вид графика на рис.

3.5. Здесь, для удобства математических преобразований, положим  $\frac{A}{2} = P_{рад.уд.}^{ср} = 1$

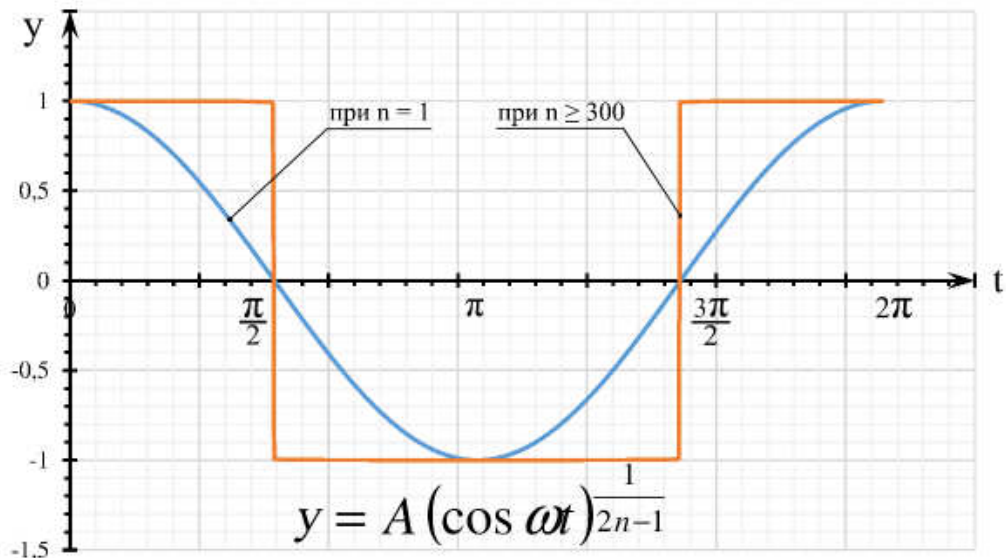


Рис. 3.4 Уравнение и графики исходной функции для определения изменения во времени распределения радиальных сил по длине режущих элементов

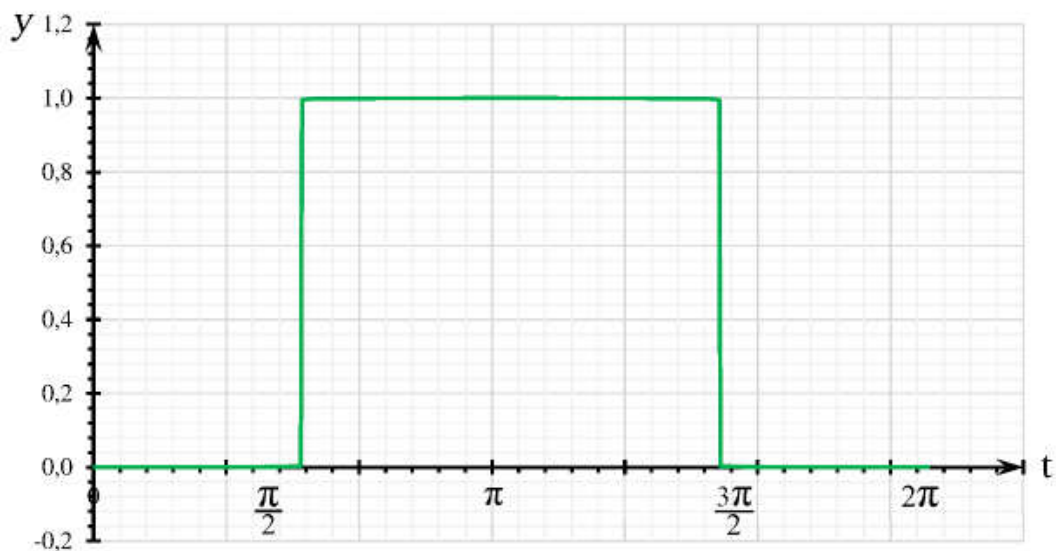


Рис. 3.5. Скорректированный промежуточный вид графика исходной функции для определения изменения во времени распределения радиальных сил по длине режущих элементов



На приведенных графиках в момент времени  $t = \pi$  осуществляется реверс возвратно-поступательного перемещения. При этом, с учетом п.4 данного параграфа, имеет место следующее.

Тыльные и фронтальные части функционально меняются местами. Следовательно, с учетом этого, необходима соответствующая корректировка графика на рис. 3.5. Иными словами, для верхней части режущего элемента, которая функционально становится фронтальной при возвратном движении вверх, усилие на участке графика от  $\pi$  до  $3\pi/2$  должно быть большим, чем на участке от  $\pi/2$  до  $\pi$ , а для нижней, которая становится фронтальной при поступательном движении вниз, – наоборот.

Для учета этого введем корректирующую функцию

$$y_1 = A_1 \left\{ \left[ \sin \omega \left( t - \frac{t_y}{2} \right) \right]^{2n-1} \right\}, \quad (3.18)$$

график которой изображен на рис. 3.6.

Эту функцию умножим на второй сомножитель функции (3.17) и результат сложим с последней.

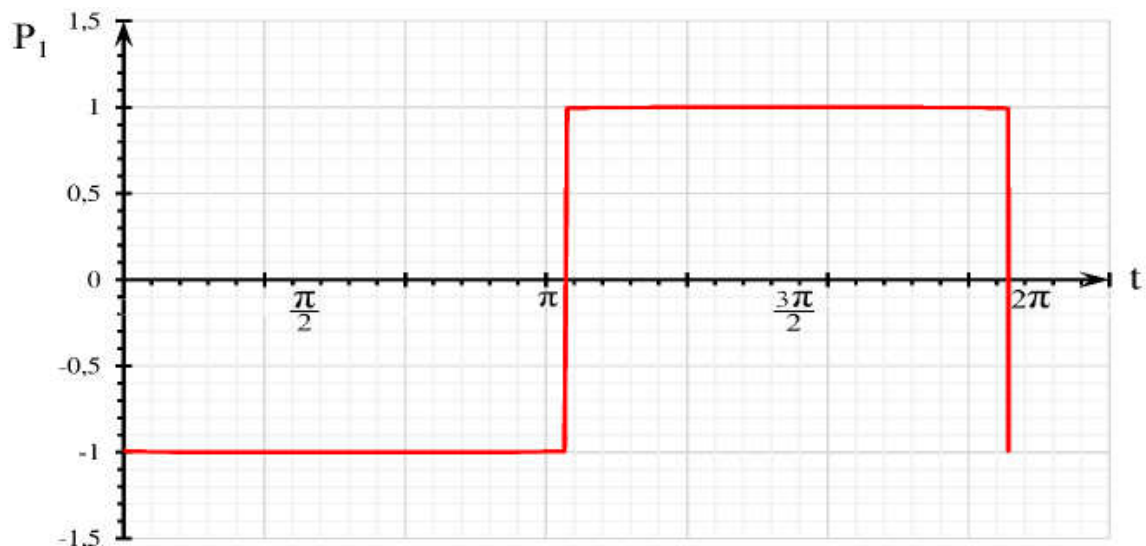


Рис. 3.6. График корректирующей функций, учитывающих изменение величины усилий резания в зависимости от направления их движения

Далее введем вторую корректирующую функцию идентичную функции (3.18)

$$y_2^B = -A_2 \left\{ \left[ \sin \omega \left( t - \frac{t_y}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2n-1}} \right\}, \quad (3.19)$$

график которой изображен на рис. 3.7, которую так же умножим на второй сомножитель функции (3.17) и результат сложим с последней суммой.

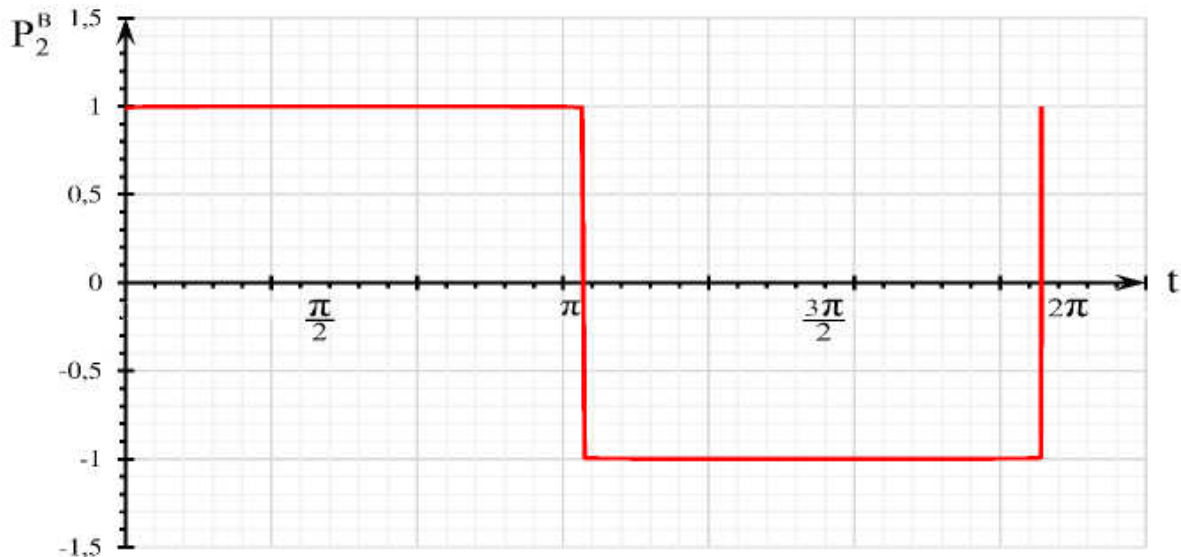


Рис. 3.7. График корректирующей функции, учитывающий изменение величины усилий резания в зависимости от соотношения удаляемого припуска при возвратном и поступательном перемещениях инструмента при хонинговании с дозированной дискретной радиальной подачей реализуемой соответственно в крайних верхнем положении

В случае реализации дозированной подачи в крайнем нижнем положении функция (3.19) изменится следующим образом

$$y_2^H = A_2 \left\{ \left[ \sin \omega \left( t - \frac{t_y}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2n-1}} \right\} \quad (3.20)$$

график которой изображен на рис. 3.8.

Здесь необходимо заметить, что время контактирования каждого элементарного участка режущей поверхности на участках соответствующих значениям перебегов  $l_1$  и  $l_2$  различно и возрастает в направлении от периферии к середине режущих элементов. Для учета этого необходимо ввести соответствующие корректировочную функцию в уравнения (3.17 – 3.20). Здесь, это наиболее удобно осуществить посредством замены постоянной величины  $\omega$

на переменную величину  $\omega_1$ , которая функционально связана с временем контактирования элементарных участков режущих элементов по их длине.

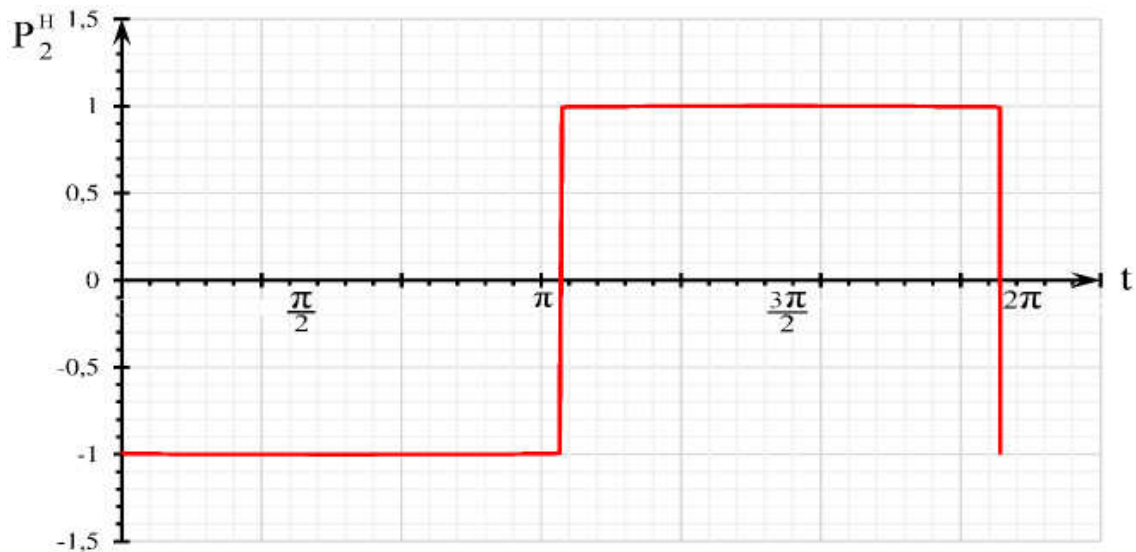


Рис. 3.8. Графики корректирующей функции, учитывающий изменение величины усилий резания в зависимости от соотношения удаляемого припуска при возвратном и поступательном перемещениях инструмента при хонинговании с дозированной дискретной радиальной подачей реализуемой в крайних нижнем положении инструмента

Отметим, что на графиках рис.3.3 д фиксированные моменты времени  $t_0$  и  $t_6$  по оси  $t$  соответствуют:

- $t_0$  и  $t_6$  максимальному значению перебега  $l_1$  при поступательном и при возвратном перемещениях инструмента (крайнее верхнее положение инструмента, момент верхнего реверса);

- $t_1$  и  $t_5$  нулевому значению перебега  $l_1$  (моменты начала и окончания контакта по всей длине режущего элемента при поступательном и возвратном перемещениях);

- $t_2$  и  $t_4$ , нулевому значению перебега  $l_2$  (моменты окончания и начала контакта по всей длине режущего элемента при поступательном и возвратном перемещениях);

- $t_3$ , максимальному значению перебега  $l_2$  (крайнее нижнее положение инструмента, момент нижнего реверса).

Запишем значения этих времен.

$$\begin{aligned}
t_0 &= 0; & t_3 &= (l_\delta - l_\sigma + l_1 + l_2)/V_{e.n}; & t_5 &= (2l_\delta - 2l_\sigma + l_1 + 2l_2)/V_{e.n}; \\
t_1 &= l_1/V_{e.n}; & t_4 &= (l_\delta - l_\sigma + l_1 + 2l_2)/V_{e.n}; & t_6 &= 2t_3 = 2(l_\delta - l_\sigma + l_1 + l_2)/V_{e.n} = T_y. \\
t_2 &= (l_\delta - l_\sigma + l_1)/V_{e.n}; & & & & 
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Тогда искомое время контактирования (положительная часть графика по оси  $t$ ) для точек 1 – 4 будет равно:

$$\left\{ \begin{aligned}
t_1^k(0) &= t_5 - t_1 = \frac{2l_\delta - 2l_\sigma + l_1 + 2l_2}{V_{e.n}} - \frac{l_1}{V_{e.n}} = 2 \frac{l_\delta - l_\sigma + l_2}{V_{e.n}} \\
t_2^k(x_0) &= t_5^{x_0} - t_1^{x_0} = \frac{2l_\delta - 2l_\sigma + l_1 + x_0 + 2l_2}{V_{e.n}} - \frac{l_1 - x_0}{V_{e.n}} = 2 \frac{l_\delta - l_\sigma + l_2 + x_0}{V_{e.n}} \\
t_3^k(2x_0) &= t_5^{2x_0} - t_1^{2x_0} = \frac{2l_\delta - 2l_\sigma + l_1 + 2x_0 + 2l_2}{V_{e.n}} - \frac{l_1 - 2x_0}{V_{e.n}} = 2 \frac{l_\delta - l_\sigma + l_2 + 2x_0}{V_{e.n}} \\
t_4^k(3x_0) &= t_5^{3x_0} - t_1^{3x_0} = \frac{2l_\delta - 2l_\sigma + l_1 + 3x_0 + 2l_2}{V_{e.n}} - \frac{l_1 - 3x_0}{V_{e.n}} = 2 \frac{l_\delta - l_\sigma + l_2 + 3x_0}{V_{e.n}}
\end{aligned} \right. , \tag{3.22}$$

где  $x_0$  – фиксированные значения координаты по длине режущего элемента соответственно в точках 1 (0), 2 ( $x_0$ ), 3 ( $2x_0$ ) и т.д.

Характер контактирования режущего элемента с обрабатываемой поверхностью по его длине от точки 1 до точки 4 и от точки 7 до точки 4 зеркально идентичен. Из этого следует, что с целью упрощения математических преобразований при дальнейшем рассмотрении процесса взаимодействия режущего элемента с обрабатываемой поверхностью можно ограничиться только верхней половиной режущего элемента (точки 1 ÷ 4), а результаты рассмотрения соответствующим образом (зеркально) применить для нижней половины режущего элемента.

С учетом изложенного выше и при условии замены фиксированных значений координат по длине режущих элементов  $x_0$ ,  $2x_0$  и т.д. на непрерывно изменяющуюся координату  $x$ , запишем

$$\omega_1 = \omega \cdot c(x(t)) = \left( \frac{\omega}{2} \right) \frac{l_\delta - l_\sigma + l_1 + l_2}{l_\delta - l_\sigma + l_2 + x(t)} \tag{3.23}$$

где: дробь в правой части равна отношению времен, при которых  $P > 0$  соответственно в числителе на графиках 1, 2, 3 и 4 рис. 3.3 д и в знаменателе на графике рис. 3.5.

С учетом основной функции (3.17), корректирующих функций (3.18, 3.19 и 3.20) и соответствующих преобразований и замен, можно записать

$$P_p = P_{рад.уд}^{сп} \left[ 1 + (\cos \omega_1 t_1)^m \right] \cdot \left[ 1 + k \cdot (\sin \omega_1 t_1)^m \right] \quad (3.24)$$

где:  $k = A_1 \mp A_2$ ;  $t_1 = t - \frac{t_u}{2}$ ;  $m = \frac{1}{2n-1}$ .

Результирующее значение сил резания, которое определяет значение работы сил резания, запишется так

$$P = P_p \cdot \sqrt{f_o^2 + f_{окр}^2} \quad \text{или} \quad (3.25)$$

$$P = P_{рад.уд}^{сп} \left[ 1 + (\cos \omega_1 t_1)^m \right] \cdot \left[ 1 + k \cdot (\sin \omega_1 t_1)^m \right] \cdot \sqrt{f_o^2 + f_{окр}^2} \quad (3.26)$$

где:  $f_o$  и  $f_{окр}$  – коэффициенты трения-царапания (табл. 3.8 [65]) в осевом и окружном (тангенциальном) направлениях.

**Вывод.** Получено уравнение, которое позволяет определять характер изменения распределения удельной нагрузки по длине режущих элементов за время одного двойного хода в зависимости от параметров наладки на операциях хонингования.

Подставляя значения  $P$  из (3.26) и  $V$  из (3.14) в (3.1), получим

$$U = \eta \cdot \int_0^{t_u} \left\{ P_{рад.уд}^{сп} \left[ 1 + (\cos \omega_1 t_1)^m \right] \cdot \left[ 1 + k \cdot (\sin \omega_1 t_1)^m \right] \cdot \sqrt{f_o^2 + f_{окр}^2} \right\} \cdot \left\{ \sqrt{\left( V_{в.н.}^{мабл.} \right)^2 \cdot \left( \sin \frac{4\pi \cdot V_{в.н.}^{мабл.} \cdot t}{4 \cdot (l_x) + V_{в.н.}^{мабл.} \cdot t_r} \right)^{2m} + V_{сп.}^2} \right\} dt \quad (3.27)$$

Заметим, что, коэффициента пропорциональности  $\eta$  в этом уравнении может быть определен через величину удельного износа алмазоносного слоя, который определяется экспериментально, и для достаточно большого числа операций по хонингованию приводится в соответствующих справочниках.

Коэффициент  $k = A_1 \mp A_2$  также может быть определен экспериментально. Например, если зафиксировать (известными методами, например, посредством тензометрических датчиков) среднее значения осевого усилия при поступательном и возвратном перемещениях в процессе обработки конкретной детали и, далее, разделить меньшее значение на большее, и умножить на величину  $P_{рад.уд}^{сп}$ , то получим величины амплитуд  $A_2$  корректирующих функций 3.19 и 3.20. Аналогичным образом можно определить величину  $A_1$ .

### 3.3 Исследование влияния параметров наладки на темп износа режущих элементов по их длине при хонинговании.

Ряд значений параметров, входящих в уравнение (3.27) примем идентичными параметрам, которые приведены в работах [38, 41, 42, 52, 53, 54, 63, 64] для операции хонингования. В качестве примера воспользуемся результатами, приведенными в работе [46] для детали гидроаппаратуры, а именно «клапанной коробки».

Итак:  $D = 31\text{мм}$ ;  $l_d = 50\text{мм}$ ;  $p_{уд} = 3,5\text{ кг/см}^2$ ; бруски  $6 \times 4 \times 1 \times 40$  АСМ40 М1 – 100;  $z = 6$ ;  $V_{вп} = 13,2\text{ м/мин}$ ;  $V_o = 30,2\text{ м/мин}$ . Коэффициенты  $f_o = 0,58$  и  $f_{окр} = 0,36$  (табл. 3.8 [65]). Амплитуды корректирующих функций  $A_1$  и  $A_2$  определим в процентном отношении от  $P_{рад,уд}^{cp}$  и условно, для удобства расчетов, положим  $A_1 = 0,67 \cdot P_{рад,уд}^{cp}$ ,  $A_2 = 0,27 \cdot P_{рад,уд}^{cp}$ . В последующих расчетах, положим так же вместо  $p_{уд} = 3,5\text{ кг/см}^2$ ,  $p_{уд} = 6\text{ кг/см}^2$  (рекомендуемые значения  $4 \div 6\text{ кг/см}^2$  для  $\varnothing 20 \div 50\text{ мм}$  (табл. 19 [42])).

Интегрирование осуществлялось численными методами, посредством табличного процессора MS EXCEL. Результаты расчетов здесь представлены в виде графиков на рис. 3.7 ÷ 3.11.

При расчете износа по длине режущих элементов в случае подачи по давлению рассчитывался профиль только верхней половины режущего элемента, а результаты переносились зеркально на нижнюю половину. Это целесообразно поскольку имеет место сомоустановление бруска по длине контакта с обрабатываемой деталью.

При расчете износа по длине режущих элементов в случае дискретной дозированной подачи рассчитывался отдельно профиль верхней заборной части режущего элемента и отдельно – профиль нижней заборной части (на рис 3.9 ÷ 3.10, соответственно, левые и правые графики). При этом интегрирование при расчете профиля верхней заборной части осуществлялось в пределах второго полупериода цикла возвратно-поступательного перемещения и, соответственно, при расчете профиля нижней заборной части – в пределах первого полупериода

цикла. Это обусловлено тем, что, во-первых, при дозированной подаче отсутствуют условия сомоустановления бруска по длине контакта с обрабатываемой деталью, а во-вторых, при движении инструмента вниз изнашивается, в основном, фронтальная нижняя часть и износом верхней части режущих элементов можно пренебречь, и наоборот, при движении инструмента вверх изнашивается, в основном, фронтальная верхняя часть и износом нижней части можно пренебречь. Кроме того, случай обработки глухого отверстия здесь приравнивался к случаю обработки сквозного отверстия с существенной асимметрией перебегов (минимальное значение перебега – в зоне дна обрабатываемого отверстия и максимальное – в зоне противоположной дну обрабатываемого отверстия).

На рис. 3.9, для случая хонингования с подачей по давлению, изображен износ профиля режущего элемента при варьировании длиной последнего и при условии выбора величин перебегов близких к оптимальным в соответствии с рекомендациями, приведенными в технической литературе, а на рис. 3.10 – при варьировании длиной перебегов при условии постоянства длины режущих элементов ( $l_6 = 0,8 l_d$ ;  $l_6 = 1,1 l_d$ ).

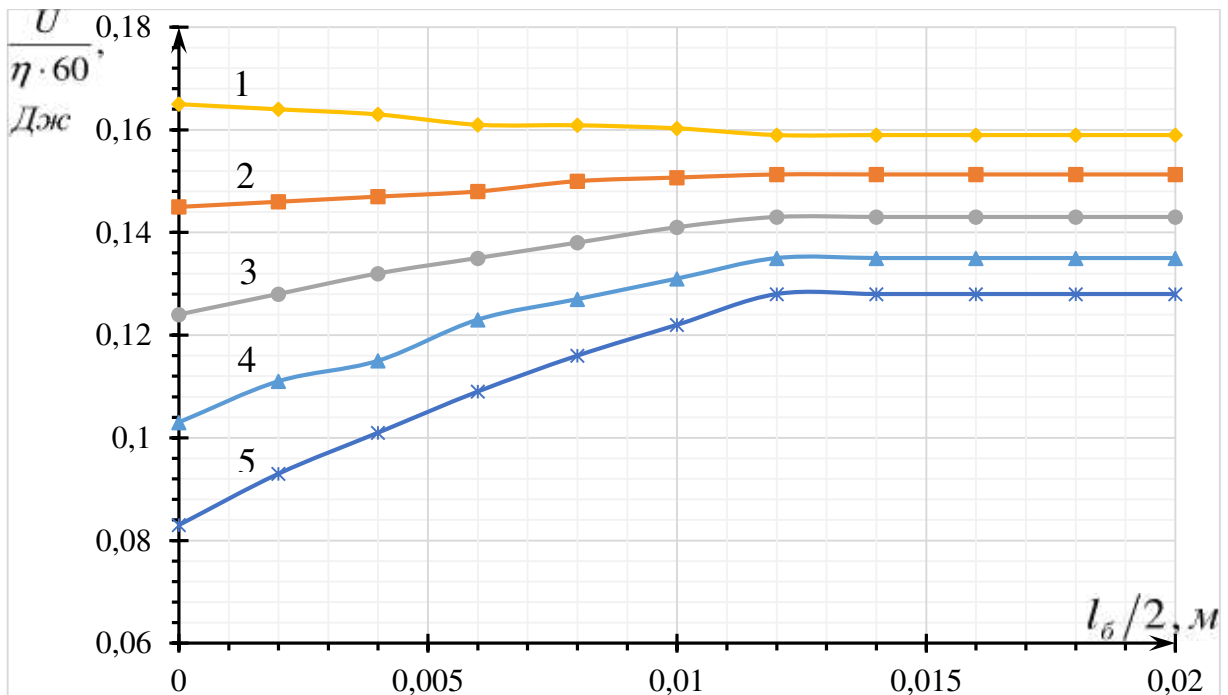


Рис. 3.9. Графики износа заборных частей режущих элементов по длине при радиальной подаче по давлению: 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно при  $l_6 = 35, 40, 45, 50, 55$  мм

На рис. 3.12 и 3.15 для случая хонингования с дозированной радиальной подачей изображен износ профиля режущего элемента при варьировании величиной перебегов, соответственно, при условии их симметричности и при условии их асимметрии. Заметим, что случай существенной асимметрии адекватен хонингованию глухого отверстия с дозированной радиальной подачей.

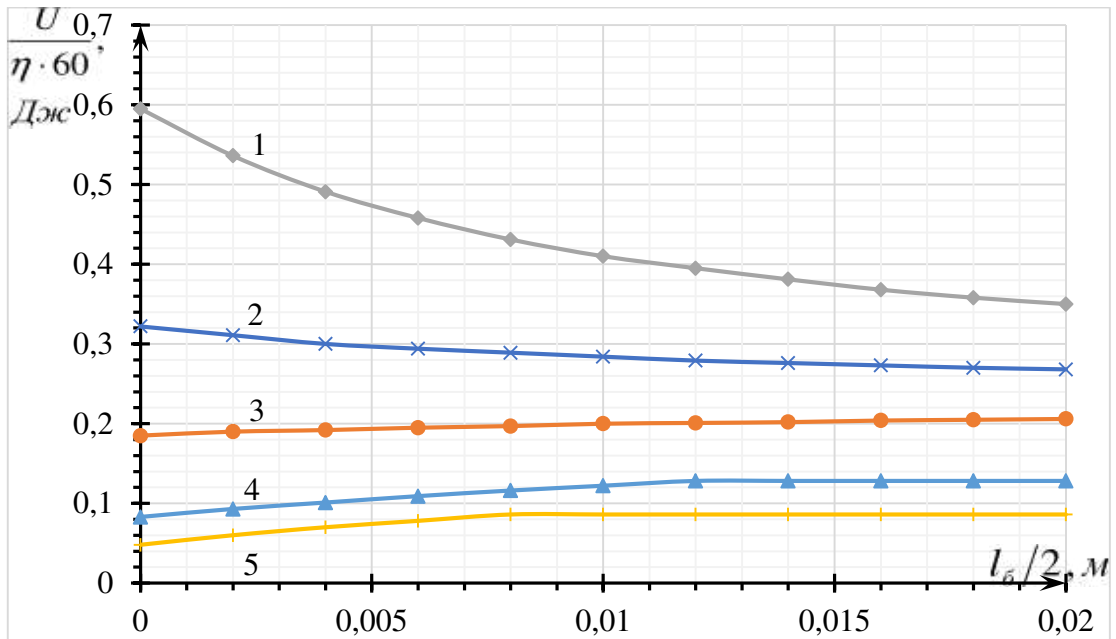


Рис. 3.10. Графики износа заборных частей режущих элементов по длине при радиальной подаче по давлению:  $l_b = 0,8 l_d$ ; 1; 2; 3; 4; 5 – соответственно при  $l_1 = l_2 = 0,25 l_b$ ;  $0,33 l_b$ ;  $0,5 l_b$ ;  $0,62 l_b$ ;  $0,75 l_b$

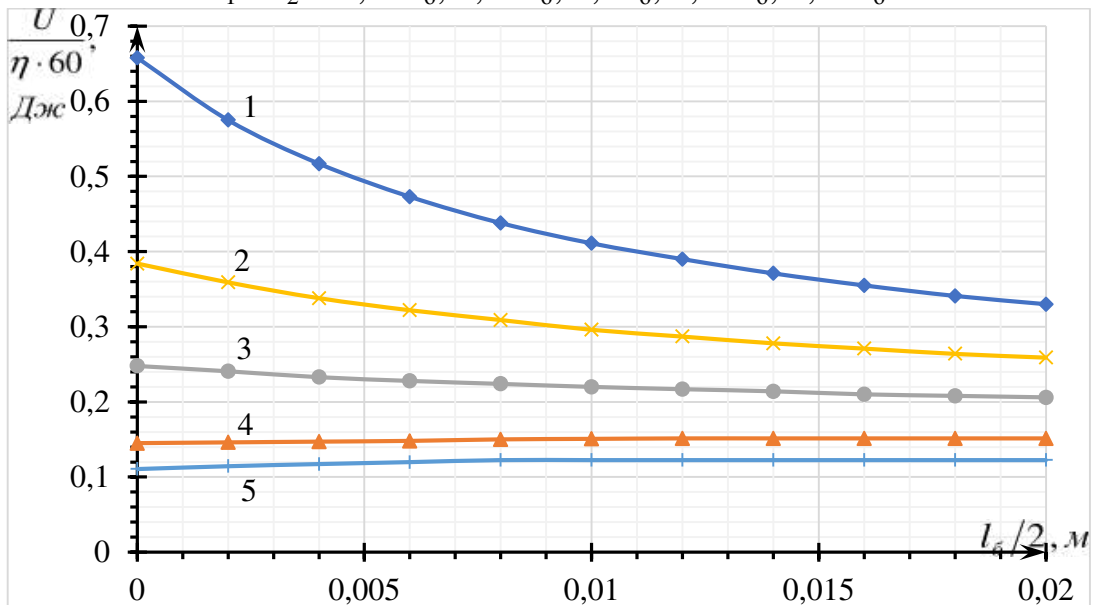


Рис. 3.11. Графики износа заборных частей режущих элементов по длине при радиальной подаче по давлению:  $l_b = 1,1 l_d$ ; 1; 2; 3; 4; 5 – соответственно при  $l_1 = l_2 = 0,25 l_b$ ;  $0,33 l_b$ ;  $0,5 l_b$ ;  $0,62 l_b$ ;  $0,75 l_b$

Из рис. 3.9 видно, что минимальная разница износа по длине режущих элементов находится между кривыми 1 – 2, то есть при длине бруска 35 – 40 мм.



При этом, перебеги  $l_1 = l_2 = 1/3 l_6$  близкие к оптимальным, для остальных кривых это соотношение не оптимальное, а на рис. 3.10 и 3.11 – то же самое, но только, соответственно, между кривыми 2 – 3 и 3 – 4.

Отсюда следует теоретический вывод о том, что оптимальные значения параметров, которые приведены в технической литературе, например,  $l_{6p} = (1,2 \div 0,8)l_{отв}$ ;  $l_{неp} = \left(\frac{1}{3} \div \frac{3}{4}\right)l_{6p} = opt$  и др., являются условными и взаимозависимыми и в каждом конкретном случае требуют уточнения.

Анализируя вид и взаимное расположение графиков на рис. 3.12 и 3.15 можно сформулировать следующие утверждения.

1. Логика построения графиков на рис. 3.14 и 3.15 такова, что величина перебега  $l_1$  меняется от  $0,5 l_6$  до  $0,25 l_6$ , т. е. уменьшается и в пределе стремится к нулю. Легко понять, что это сочетание адекватно случаю хонингования глухого отверстия, когда перебег у дна отверстия равен нулю. При этом, момент реализации дозированной подачи совпадает с моментом нахождения режущих элементов в зоне дна обрабатываемого отверстия, т.е. в зоне реализации перебега  $l_1$ .

3. Из вида и взаимного расположения графиков следует вывод о том, что, варьируя величинами перебегов и их асимметрией в сочетании с моментом реализации дозированной подачи в зоне меньшего перебега, возможно установить такое сочетание параметров реализации процесса хонингования, при котором темп износа по длине режущих элементов будет одинаковым (на рис 3.13 и 3.14 кривые 3 и 4)

Таким образом, из изложенного выше следует обобщающий вывод, что при обработке глухих отверстий, когда имеет место вынужденная асимметрия перебегов, необходимо момент дозированной подачи осуществлять в зоне дна обрабатываемого отверстия, что обуславливает трансформацию схемы хонингования глухих отверстий из «толкающей» в «тянущую». При этом, существенно расширяются возможности по повышению эффективности и точности хонингования глухих отверстий.

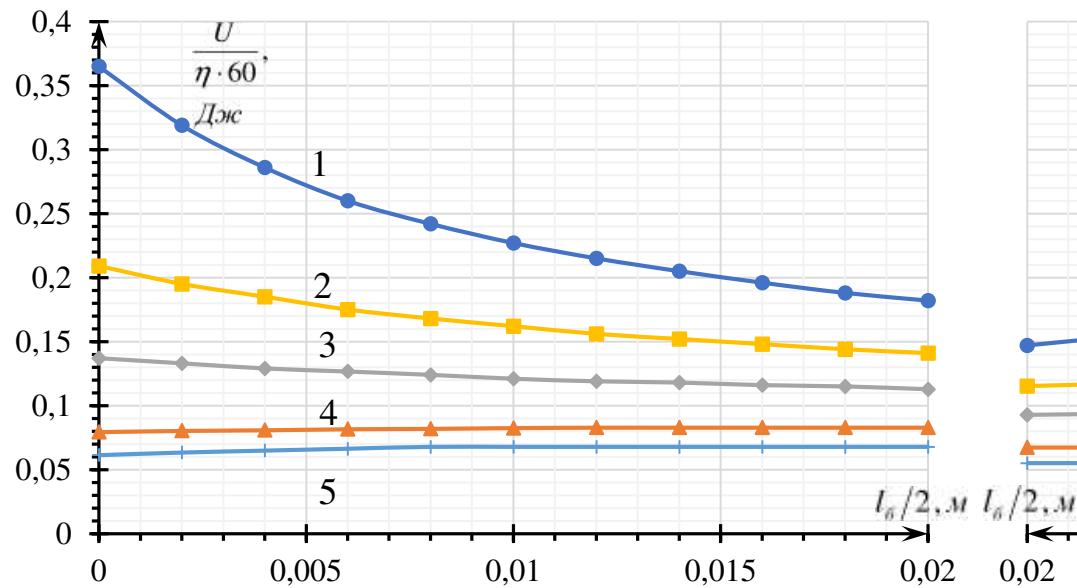


Рис. 3.12. Графики износа верхней заборной части режущих элементов по длине при дозированной радиальной подаче:  $l_6 = 0,8 l_d$ ; 1; 2; 3; 4; 5 – соответственно при  $l_1 = l_2 = 0,25 l_6$ ;  $0,33 l_6$ ;  $0,5 l_6$ ;  $0,62 l_6$ ;  $0,75 l_6$

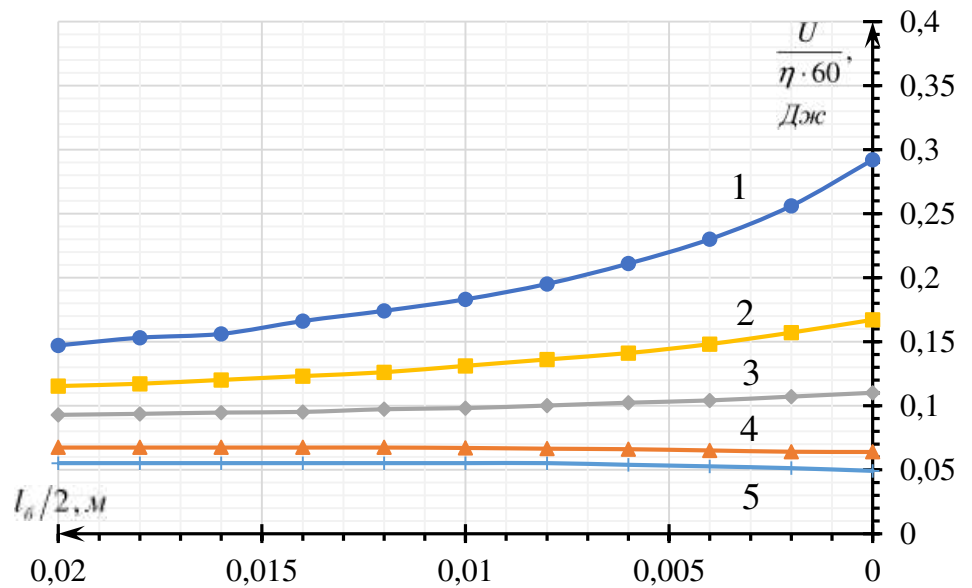


Рис. 3.13. Графики износа нижней заборной части режущих элементов по длине при дозированной радиальной подаче:  $l_6 = 0,8 l_d$ ; 1; 2; 3; 4; 5 – соответственно при  $l_1 = l_2 = 0,25 l_6$ ;  $0,33 l_6$ ;  $0,5 l_6$ ;  $0,62 l_6$ ;  $0,75 l_6$

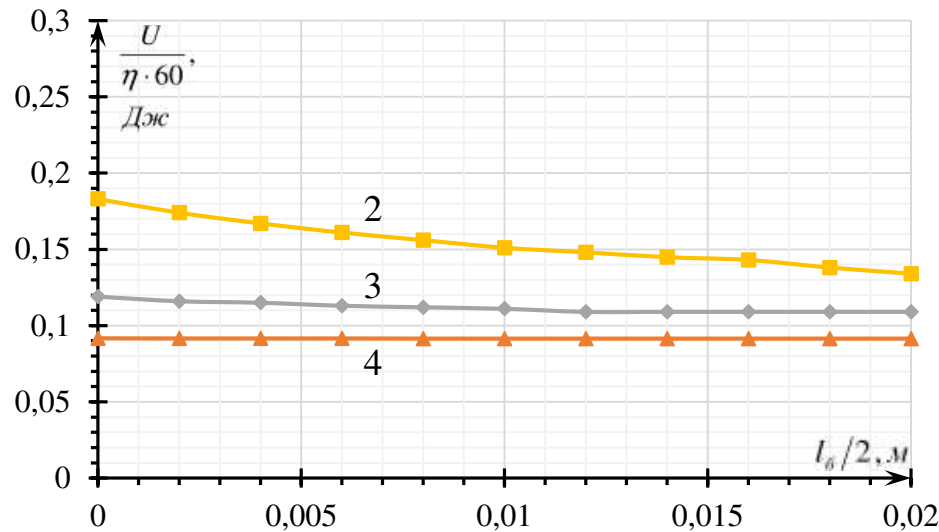


Рис. 3.14. Графики износа верхних заборных частей режущих элементов по длине при дозированной радиальной подаче:  $l_6 = 0,8 l_d$ ; 2; 3; 4 – соответственно при  $l_1 = 0,5 l_6$  и  $l_2 = 0,75 l_6$ ;  $l_1 = 0,33 l_6$  и  $l_2 = 0,62 l_6$ ;  $l_1 = 0,25 l_6$  и  $l_2 = 0,5 l_6$ .

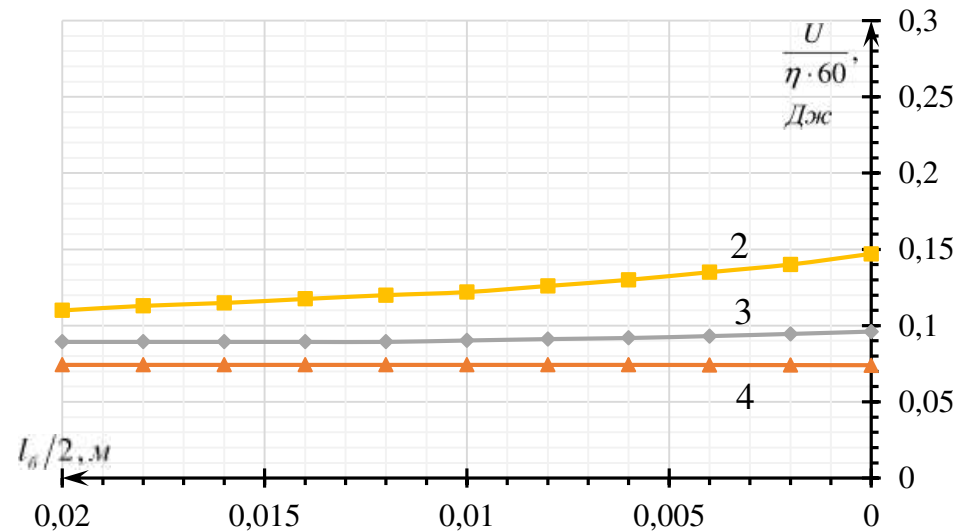


Рис. 3.15. Графики износа нижних заборных частей режущих элементов по длине при дозированной радиальной подаче:  $l_6 = 0,8 l_d$ ; 2; 3; 4 – соответственно при  $l_1 = 0,5 l_6$  и  $l_2 = 0,75 l_6$ ;  $l_1 = 0,33 l_6$  и  $l_2 = 0,62 l_6$ ;  $l_1 = 0,25 l_6$  и  $l_2 = 0,5 l_6$ .

4. Базируясь на выводах 1 – 3 разработан новый способ хонингования [56], суть которого более детально представлена в параграфе 4.1.1.

### **Вывод по третьему разделу**

Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать параметры процесса хонингования и, тем самым, повышать эффективность процесса обработки деталей машин и расширить технологические возможности операций хонингования, за счет соответствующей модернизации технологического оборудования; а также создавать новые схемы и способы хонингования нестандартных отверстий.

## РАЗДЕЛ 4.

### РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ ХОНИНГОВАНИЯ

Разработка новых способов хонингования глухих отверстий в этом разделе осуществляется с учетом анализа генерирования погрешностей и направлений совершенствования процесса хонингования, которые были выявлены и сформулированы в предшествующих разделах. Здесь обозначим эти направления в несколько иной редакции. Это:

- создание условий, при которых темп износа по длине режущих элементов обуславливал бы само-формирование цилиндричности рабочей части инструмента;

- изменение направления вектора генерирования погрешности (направления взаимной продольной ориентации инструмента и детали) с учетом эффекта взаимной правки в контакте инструмент – деталь;

- введение компенсационного поворота режущих элементов.

При этом структурно изложение материала построено так, что изначально рассматриваются известные способы, принятые в качестве прототипов, затем описываются вновь созданные и, далее, приводится анализ и сравнительная оценка их технологических возможностей.

#### **4.1 Разработка способов хонингования на основе само-формирования в процессе износа цилиндричности рабочей части инструмента**

##### **4.1.1 Разработка способа хонингования с управляемым темпом съема металла при прямом и возвратном перемещениях инструмента**

В разделе 2 был рассмотрен механизм износа по длине режущих элементов при традиционной схеме хонингования сквозных отверстий. При этом отмечалось, что при хонинговании с подачей по давлению и дозированной непрерывной радиальной подачей величины нижнего верхнего перебегов при наладке выбираются равными, а при хонинговании с дозированной дискретно

радиальной подачей – величина нижнего перебега при наладке выбирается вынужденно большей, чем величина верхнего перебега.

При хонинговании же глухих отверстий реализация двухстороннего перебега, и тем более большей величины перебега в зоне дна обрабатываемого отверстия (нижнего), невозможна из-за конструктивных особенностей таких отверстий.

На рис. 4.1 для наглядности изложения, повторно приведена схема формирования фронтальных заборных частей режущих элементов при поступательном (а) и возвратном (б) перемещениях для случая хонингования глухих отверстий. Ранее эта схема представлена в табл. 2.4. строка 5.

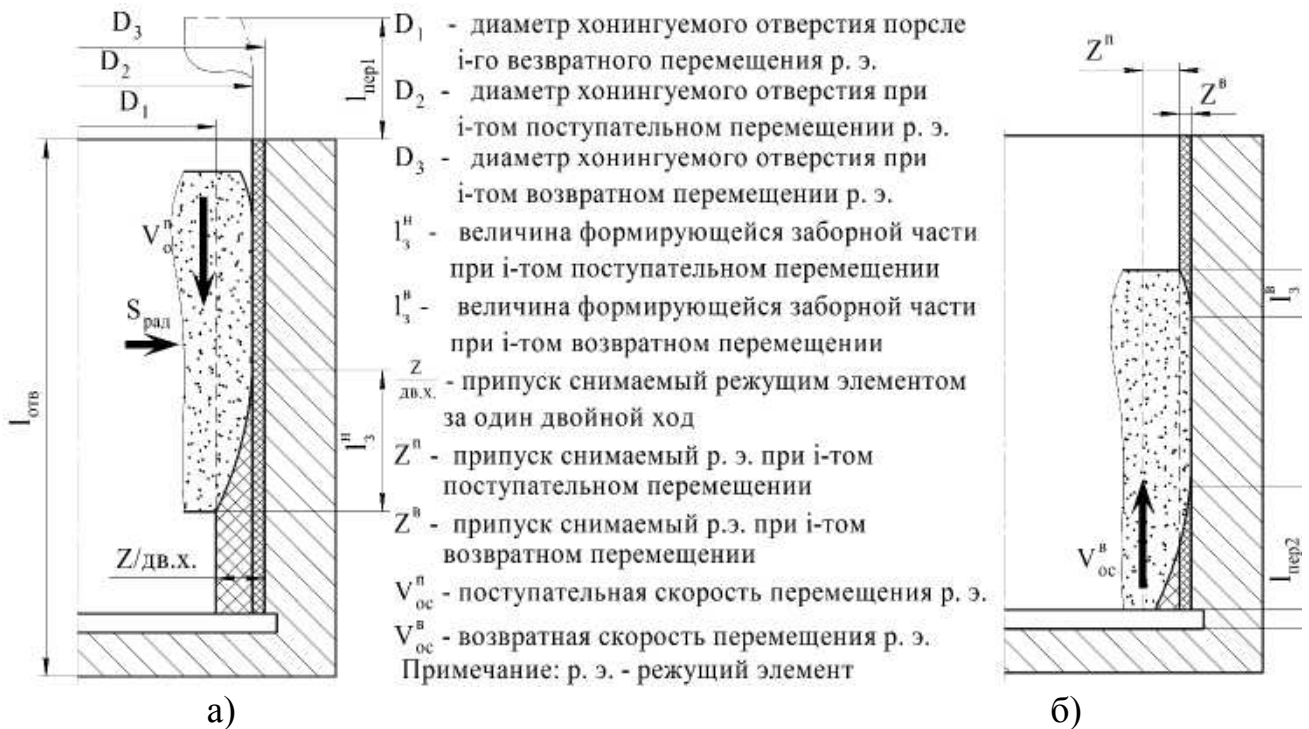


Рис. 4.1 Схема формирования фронтальных заборных частей режущих элементов при хонинговании глухих отверстий: поступательном (а) и возвратном (б) перемещениях инструмента.

Из рис. 4.1 видно, что при поступательном перемещении режущих элементов удаляется существенно большая часть припуска чем при возвратном. Соответственно, величина нижней заборной части существенно больше, чем величина верхней заборной части. Это обстоятельство обуславливает неизбежность наличия в зоне дна обрабатываемого отверстия не удаленного

припуска, что в свою очередь обуславливает формирование погрешности формы в виде конусности.

Исходя из анализа схемы съема припуска при поступательном и возвратном перемещениях в данной работе разработан новый способ хонингования, в котором изменен цикл обработки, а именно: дозированная радиальная подача осуществляется в момент реверса возвратно-поступательного перемещения в зоне дна обрабатываемого отверстия [56].

Реализация дозированной подачи в зоне дна обрабатываемого отверстия в сравнении с известной схемой хонингования, когда дозированная подача реализуется в зоне, противоположной дну обрабатываемого отверстия, зеркально меняет интенсивность износа фронтальных частей. А именно, при возвратном перемещении инструмента имеет место более интенсивный съем припуска и, соответственно, более интенсивный износ соответствующей (верхней) фронтальной части режущих элементов по отношению к износу нижней фронтальной части режущего элемента за время поступательного перемещения. При этом, за время перебега (реализуемого только в зоне противоблошной дну обрабатываемого отверстия) износ верхней части режущих элементов отсутствует, что компенсирует повышенный предшествующий износ. Таким образом нивелируются величины износа верхней и нижней фронтальных частей что соответственно обеспечивает более высокую точность обработки глухих отверстий.

#### 4.1.2. Экспериментальная апробация разработанного способа

Исследования проводили с использованием экспериментального стенда (рис. 4.2; приложение Д) на экспериментальных образцах из стали 40Х, твердостью 42 – 45 ед. по HRC по схеме с плавающей хонинговальной головкой, оснащенной комплектом из четырех брусков 5 x 4 x 50 x 2 марки режущего материала АСП6 М1 концентрацией 100%. Длина и диаметр хонингуемого отверстия соответственно 70 мм и 40 мм. Режимы резания:  $V_{окр} = 45$  м/мин;  $V_{в.п.} = 12$  м/мин;  $S_p = 0,5$  мкм/дв.ход.

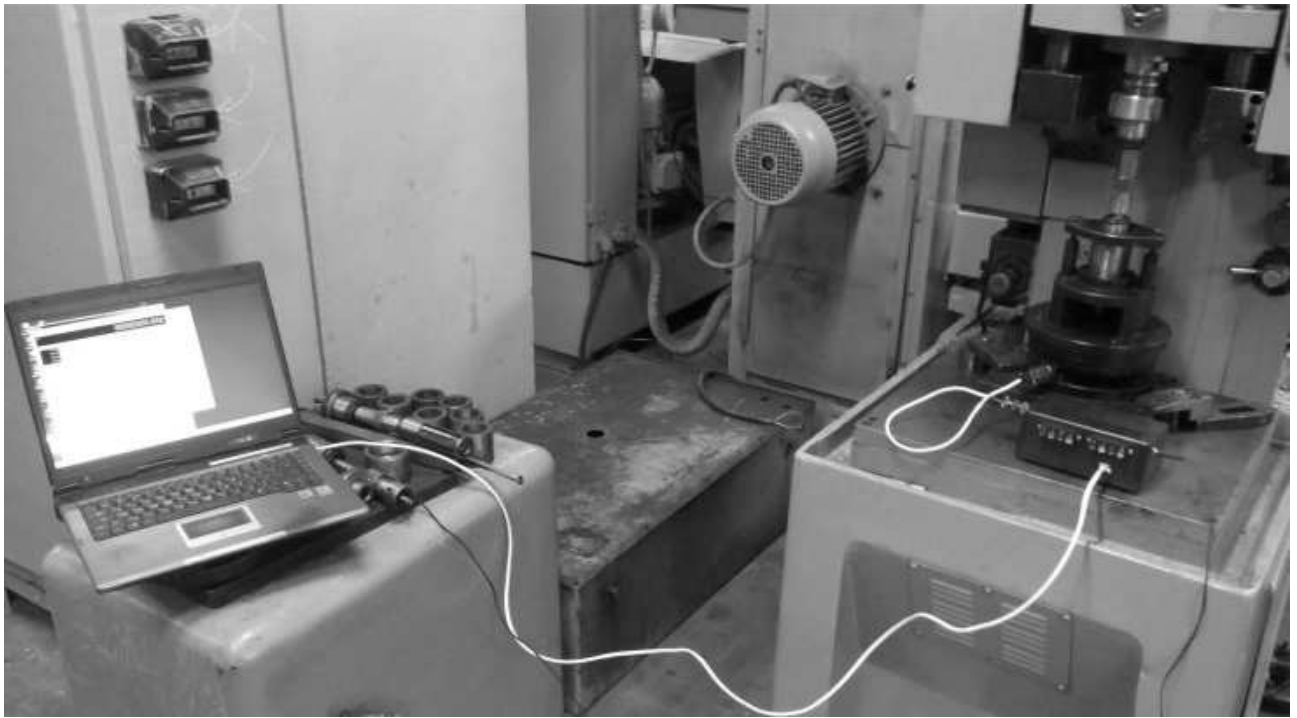


Рис. 4.2 Экспериментальный стенд

Методика проведения эксперимента включала обработку трех партий деталей по 10 шт. в каждой партии. Первая партия хонинговалась с равными величинами перебегов  $l_1 = l_2 = 18$  мм. Вторая партия хонинговалась с величинами перебегов  $l_1 = 18$  мм,  $l_2 = 2$  мм (имитация процесса хонингования глухого отверстия с дозированной дискретной радиальной подачей, реализуемой в зоне противоположной дну обрабатываемого отверстия). Третья партия хонинговалась с величинами перебегов  $l_1 = 0$  мм,  $l_2 = 18$  мм (имитация процесса хонингования глухого отверстия с дозированной дискретной радиальной подачей, реализуемой в зоне дна обрабатываемого отверстия). Каждая деталь подвергалась пятидесяти кратному хонингованию по 30 сек. в каждом цикле. После каждого цикла бруски и поверхность отверстия смазывались индустриальным маслом 20. После обработки каждой партии детали хон. головка прирабатывалась на контрольной партии деталей с варьированием перебегов таким образом, чтобы ликвидировать конусность инструмента до величины 2 – 3 мкм. Измерялась разность диаметров (конусность) в конце обработки. По данным замеров в каждой партии определялось среднее значение конусности. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.1.



Таблица 4.1

## Результаты экспериментальных данных

	Вид радиальной подачи		
	По давлению	Дискретная дозированная	
Значения величин перебігов, мм	$l_1 = l_2 = 18$	$l_1 = 18; l_2 = 2$	$l_1 = 0, l_2 = 18$
Величина погрешности в виде конусности, мкм	9	34	4

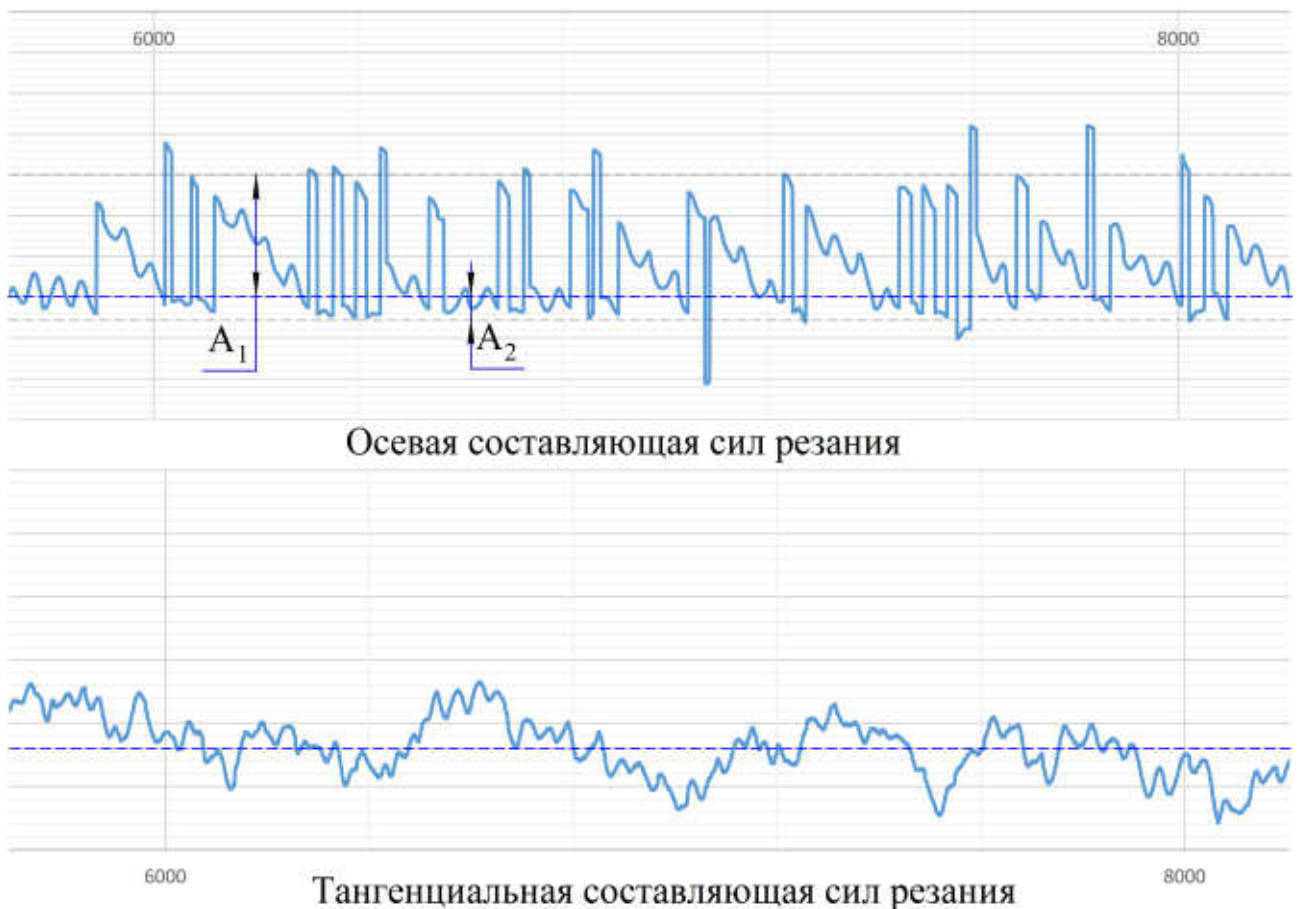


Рис. 4.3. Осциллограммы осевой и тангенциальной составляющей силы резания

При каждом цикле хонингования производилась запись силовых параметров процесса. На рис. 4.3 приведены осциллограммы осевой и тангенциальной составляющей силы резания (соответственно верхняя и нижняя осциллограммы). Аналогичные осциллограммы приводятся в технической литературе и получены отечественными и зарубежными авторами для самых различных операций при хонинговании с дозированной подачей.

Осциллограмма осевой составляющей силы резания также, как и схема на рис. 4.1 наглядно демонстрирует то обстоятельство, что при поступательном перемещении интенсивность съема припуска на порядок выше, чем при возвратном перемещении, и это также служит подтверждением логичности реализации дозированной подачи в зоне дна обрабатываемого отверстия.

### **Выводы.**

1. Операции хонингования глухих отверстий следует осуществлять по схеме с импульсной дозированной радиальной подачей, реализуемой в зоне дна обрабатываемого отверстия, что повышает точность обработки примерно на порядок.

2. Логика разработки нового способа хонингования обуславливает алгоритм управления точностью формы в продольном сечении, суть которого заключается в том, что дозированную импульсную подачу следует разделить на две части: одну из них реализовать в верхнем положении инструмента, а вторую – в нижнем.

Варьируя величинами подач в верхнем и нижнем положениях инструмента можно управлять интенсивностями съема металла при поступательном и возвратном перемещении инструмента и, соответственно, характером износа по длине режущих элементов и, тем самым, видом и величиной генерируемой погрешности.

3. Разработанный способ можно реализовать на известных станках, за счет соответствующей незначительной модернизации системы управления станка. Например, достаточно связать команду на дозированный разжим режущих элементов с моментом реверса в зоне дна обрабатываемого отверстия.

#### 4.1.3 Разработка способа хонингования с переменной износостойкостью по длине режущих элементов

Ранее, в параграфе 1.3 отмечено, что при обработке поверхности глухого отверстия целесообразно применение такой формы хонинговальных брусков,

при которой обеспечивается расположение наибольшего количества режущих зерен возможно ближе к торцу рабочей части инструмента в зоне дна обрабатываемого отверстия. Это, по сути, дает еще один вариант управления механизмом формирования погрешности на основе создания переменной износостойкости по длине режущих элементов. Однако это техническое решение не получило должного использования на практике.

В связи с этим, возникает необходимость более тщательного рассмотрения этого варианта управления формированием погрешностей в продольном сечении.

Установлено, что степень исправления конусообразности отверстия зависит от отношения оснований трапеции

$$\varepsilon = V_1/V. \quad (4.1)$$

В каждом конкретном случае оптимальное значение  $\varepsilon$  следует подбирать опытным путем. Как видно из таблицы 1.3, для данного конкретного случая, эффективное исправление конусности достигается при значениях  $\varepsilon = 0,4 \div 0,5$ .

Подбор  $\varepsilon$  опытным путем предполагает следующее.

Необходимо изначально изготовить режущие элементы с постоянным значением ширины по их длине и прошлифовать режущие элементы на круглошлифовальном станке для формирования требуемой цилиндрической формы.

Далее, осуществляется обработка достаточно большой партии деталей и фиксируется получаемая стабильная конусность, которая повторяется от детали к детали. Для того, чтобы определить примерное количество деталей в партии, выполним следующие ориентировочные расчеты.

При обработке одной детали удельный размерный износ сравнительно малая величина. Например, при хонинговании сквозных отверстий в шатунах СМД14 из стали 45Х НВ 250 ( $d_{отв} = 84$  мм;  $l_{отв} = 90$  мм) брусками 8 x 5 x 1 x 50 АСП 5 – М1 – 100 (число брусков  $z = 8$ ) [42, приложение Г], величина радиального размерного износа за время обработки одной детали составит 0,29, мКм. (*толщина алмазоносного слоя / количество обработанных деталей = 1 / 3500 = 0,29 мКм.*). Если условно принять, что при хонинговании глухих

отверстий темпы износа режущих элементов в верхней и нижней частях соотносятся как 1:2, то после обработки первой детали при величине размерного износа 0,29 мКм в середине величина размерного износа по краям режущих элементов составит: в верхней части 0,386 мКм, а в нижней 0,193 мКм. То есть, приобретённая конусность на инструменте в рассматриваемом случае составит 0,193 мКм. При обработке последующих деталей будет иметь место убывающее приращение величины конусности и при каком-то достаточно большом числе обработанных деталей процесс приращения конусности прекратится и будет иметь место эквидистантный износ инструмента.

Примем грубые допущения о том, что приращение величины конусности на инструменте постоянно от детали к детали, и величина конусности на инструменте равна величине формируемой конусности на детали. При этих условиях, если значение конусности из табл. 1 (130 мКм) разделить на полученную величину удельного темпа износа (0,193 мКм), то получим число 674 шт. Это примерное число деталей, которое необходимо обработать, чтобы на инструменте сформировалась конусность в 130 мКм.

Полученное число деталей в силу принятых грубых допущений, является существенно заниженным. Реально необходимое число деталей будет существенно большим.

Таким образом, получен порядок числа деталей, подлежащих обработке, чтобы экспериментально зафиксировать получаемую конусность при  $\varepsilon = 1$ .

Далее, эти же действия необходимо повторить при  $\varepsilon = 0,5$  (конусность +74 мКм) и  $\varepsilon = 0,3$  (конусность – 62 мКм). При этом выбор значения  $\varepsilon$  носит случайный характер и по каждому из них необходимо хонингование соответствующего количества деталей. Методом интерполяции определим, что искомое значение  $\varepsilon \approx 0,35 \div 0,4$ .

Вывод. Использование инструмента с режущими элементами трапецеидальной формы предполагает необходимость контрольного (экспериментального) хонингования сравнительно большого количества

отверстий, исчисляемого тысячами и десятками тысяч, т. е. характеризуется большой трудоемкостью.

Далее необходимо отметить, что существует оптимальное значение ширины брусков, при котором процесс хонингования наиболее эффективен. Варьирование же шириной брусков по их длине в соответствии с таблицей 1.3 (более чем в два раза) приведет к тому, что хонингование существенно большей частью рабочей поверхности брусков будет осуществляться в неоптимальном режиме. Это неизбежно отразится на эффективности процесса съема припуска, удельного износа алмазоносного слоя, качестве обработанной поверхности и т.д.

Необходимо также отметить, что в конструкциях хонинговальных головок суммарная ширина брусков выбирается в соответствии с формулой [42, 77, 83]:

$$Bz = (0,25 \div 0,35)\pi d_{омв} \quad (4.2)$$

Суммарная ширина брусков  $Bz$  может быть определена двояко.

Изначально, по эмпирическому графику [42] определяется ширина алмазного бруска  $B$  в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия  $d_{омв}$  и затем, по формуле (4.2) – количество брусков  $z$ .

Либо, изначально, конструктивно, в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия, определяется количество брусков, затем по формуле (4.2) – ширина брусков.

Далее, если допустить, что для определения габаритных размеров трапецидального бруска может быть использована формула (4.2), то неясно, чему будет соответствовать искомая ширина: верхнему основанию трапеции  $B$ , нижнему основанию трапеции  $B_1$  или какому-то промежуточному значению.

Кроме того, отсутствует информация в отношении факторов, определяющих закон изменения величины  $x = (zB)/(\pi D_{омв})$  в диапазоне 0,25 ... 0,35, которым регламентируется выбор суммарной ширины брусков.

Поэтому здесь необходимо дополнительное исследование по уточнению алгоритма выбора габаритных размеров трапецидальных брусков,

предназначенных для хонингования глухих отверстий. Кроме того, необходимо в первом приближении оценка эффективности применения таких брусков.

Для этого, из имеющихся в литературе экспериментальных данных, инвариантно к диаметальному размеру, параметрам конструкции инструмента и свойствам алмазосодержащего слоя и материала заготовки, выполним, по отношению к величине  $x$  статистический анализ выборок наиболее характерных операций хонингования сквозных отверстий [38, 41, 42, 52, 53, 54, 63, 64] (Приложение Г) и на основе результатов этого анализа сформулируем рекомендации по выбору габаритных размеров трапецеидальных брусков для хонингования глухих отверстий.

Исходные данные для проведения указанного анализа приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Исходные данные для статистического анализа величины  $x = (zB)/(\pi D_{омв})$

№ n/n	$x_j = (\pi \cdot D_{омв. j}) / (z_j \cdot B_j)$	19	$4 \cdot 6 / \pi \cdot 31 = 0,246$	39	$4 \cdot 12 / \pi \cdot 61 = 0,250$	59	$10 \cdot 6 / \pi \cdot 92 = 0,207$
1	$3 \cdot 2 / \pi \cdot 8 = 0,238$	20	$4 \cdot 6 / \pi \cdot 32 = 0,238$	40	$4 \cdot 12 / \pi \cdot 61 = 0,250$	60	$9 \cdot 12 / \pi \cdot 100 = 0,343$
2	$3 \cdot 3 / \pi \cdot 8 = 0,358$	21	$4 \cdot 8 / \pi \cdot 35 = 0,291$	41	$6 \cdot 6 / \pi \cdot 61 = 0,187$	61	$9 \cdot 12 / \pi \cdot 100 = 0,343$
3	$3 \cdot 3 / \pi \cdot 10 = 0,286$	22	$4 \cdot 5 / \pi \cdot 35 = 0,181$	42	$6 \cdot 13 / \pi \cdot 65 = 0,382$	62	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 100 = 0,229$
4	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 11 = 0,347$	23	$4 \cdot 11 / \pi \cdot 37 = 0,378$	43	$7 \cdot 11 / \pi \cdot 72 = 0,340$	63	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 10 = 0,227$
5	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 12 = 0,318$	24	$3 \cdot 6 / \pi \cdot 38 = 0,150$	44	$7 \cdot 11 / \pi \cdot 72 = 0,340$	64	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 101 = 0,227$
6	$4 \cdot 3 / \pi \cdot 13 = 0,293$	25	$3 \cdot 6 / \pi \cdot 38 = 0,150$	45	$4 \cdot 8 / \pi \cdot 72 = 0,141$	65	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 103 = 0,222$
7	$4 \cdot 3 / \pi \cdot 13 = 0,293$	26	$3 \cdot 12 / \pi \cdot 38 = 0,301$	46	$6 \cdot 13 / \pi \cdot 75 = 0,331$	66	$4 \cdot 20 / \pi \cdot 103 = 0,247$
8	$4 \cdot 4 / \pi \cdot 15 = 0,339$	27	$6 \cdot 3 / \pi \cdot 38 = 0,150$	47	$6 \cdot 13 / \pi \cdot 75 = 0,331$	67	$4 \cdot 20 / \pi \cdot 103 = 0,247$
9	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 16 = 0,238$	28	$4 \cdot 10 / \pi \cdot 42 = 0,303$	48	$5 \cdot 12 / \pi \cdot 79 = 0,241$	68	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 105 = 0,218$
10	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 16 = 0,238$	29	$4 \cdot 10 / \pi \cdot 42 = 0,303$	49	$5 \cdot 12 / \pi \cdot 79,5 = 0,240$	69	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 105 = 0,218$
11	$4 \cdot 5 / \pi \cdot 21 = 0,303$	30	$6 \cdot 6 / \pi \cdot 42 = 0,272$	50	$6 \cdot 10 / \pi \cdot 81 = 0,235$	70	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 111 = 0,206$
12	$3 \cdot 8 / \pi \cdot 22 = 0,347$	31	$4 \cdot 12 / \pi \cdot 42 = 0,363$	51	$6 \cdot 8 / \pi \cdot 82 = 0,186$	71	$6 \cdot 12 / \pi \cdot 111 = 0,206$
13	$4 \cdot 5 / \pi \cdot 22 = 0,299$	32	$8 \cdot 4 / \pi \cdot 45 = 0,226$	52	$6 \cdot 8 / \pi \cdot 82 = 0,186$	72	$8 \cdot 12 / \pi \cdot 120 = 0,254$
14	$3 \cdot 3,5 / \pi \cdot 27 = 0,123$	33	$8 \cdot 4 / \pi \cdot 45 = 0,226$	53	$8 \cdot 8 / \pi \cdot 84 = 0,242$	73	$8 \cdot 12 / \pi \cdot 120 = 0,254$
15	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 27 = 0,141$	34	$6 \cdot 8 / \pi \cdot 51 = 0,299$	54	$6 \cdot 6 / \pi \cdot 85 = 0,134$	74	$8 \cdot 12 / \pi \cdot 120 = 0,254$
16	$3 \cdot 4 / \pi \cdot 27 = 0,141$	35	$6 \cdot 8 / \pi \cdot 51 = 0,299$	55	$6 \cdot 6 / \pi \cdot 85 = 0,134$	75	$12 \cdot 15 / \pi \cdot 120 = 0,47$
17	$3 \cdot 8 / \pi \cdot 28,5 = 0,267$	36	$5 \cdot 8 / \pi \cdot 52 = 0,244$	56	$8 \cdot 10 / \pi \cdot 92 = 0,276$	76	$12 \cdot 15 / \pi \cdot 120 = 0,47$
18	$3 \cdot 8 / \pi \cdot 28,5 = 0,267$	37	$5 \cdot 8 / \pi \cdot 58 = 0,219$	57	$8 \cdot 10 / \pi \cdot 92 = 0,276$	77	$15 \cdot 8 / \pi \cdot 145 = 0,263$
		38	$4 \cdot 12 / \pi \cdot 61 = 0,250$	58	$10 \cdot 6 / \pi \cdot 92 = 0,207$	78	$15 \cdot 8 / \pi \cdot 145 = 0,263$

По данным таблицы 4.1, построим график (рис.4.4) рассеивания величины  $x_j$  в зависимости от диаметра обработки.

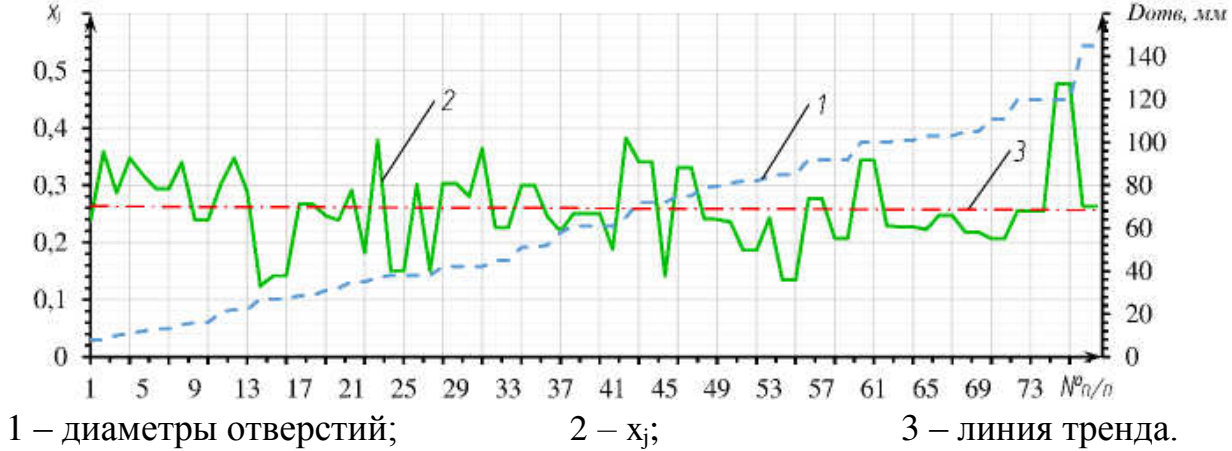


Рис. 4.4. Рассеивание величины  $x_j$  в зависимости от диаметра обработки.

Из графика наглядно видно, что величина  $x_j$  является случайной величиной по отношению к диаметру обработки. В связи с этим, применяя методику группирования в интервалы [73, 44], выполним статистический анализ значений  $x_j$  (таблица 4.3) и для наглядности построим и приведем здесь кривые рассеивания этих значений (Рис.4.5).

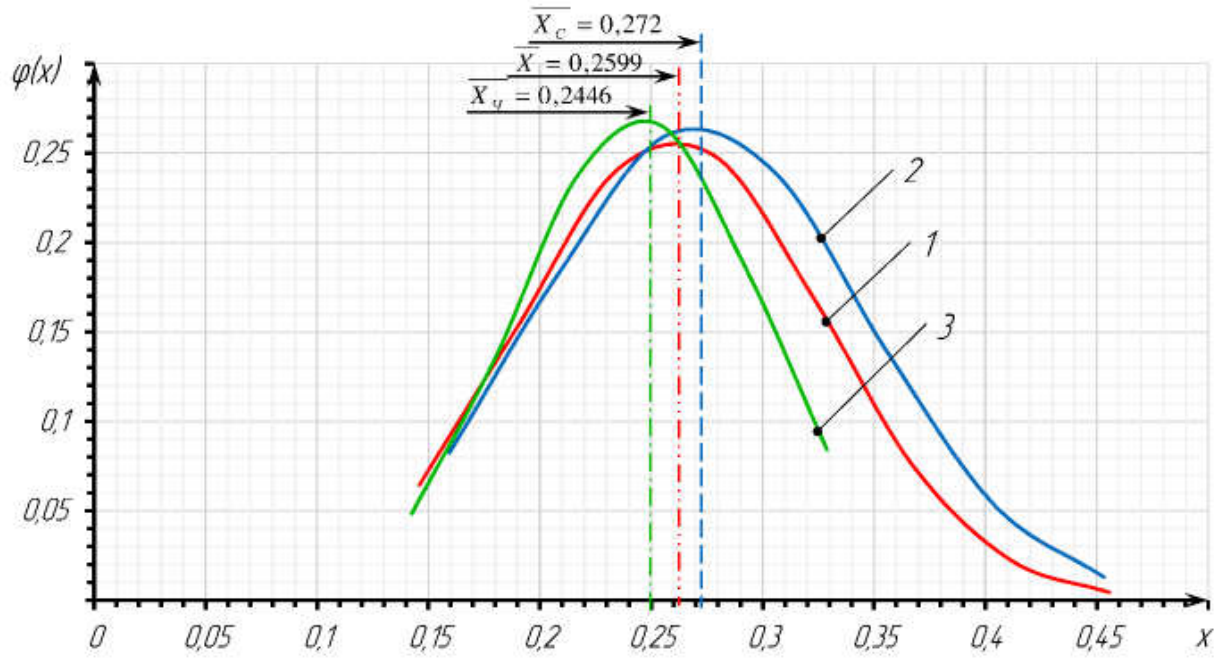


Рис. 4.5. Распределения величин  $x$  для: (1) сталей и чугунов  $\left(\frac{m'_c}{n_c}\right)$ ; (2) слей  $\left(\frac{m'_c}{n_c}\right)$ ; (3) чугунов  $\left(\frac{m'_q}{n_q}\right)$

Таблица 4.3.

Таблица сводных данных

Эмпирическое распределение $x_j$ при хонинговании стальных и чугунных деталей									
Максимальное и минимальное значения $x_j = (\pi \cdot D_{отв. j}) / (z_j \cdot B_j)$		Размах выборки W	Число интервала f	Ширина интервала d	Объём выборки n	Среднее арифметическое $\bar{X}$	Среднее квадратическое S	Критерий А.Н. Колмогорова $\lambda$	Вероятность $P(\lambda)$
$X_{max}$	$X_{min}$								
0,4777	0,123	0,353	8	0,0442	78	0,2599	0,0684	0,8215	0,5441
№ Интервала	Интервалы текущего эмпирического распределения		Середина интервала	Частота интервала	Частость интервала	Теоретическая частота	Накопленная эмпирическая частота	Накопленная теоретическая частота	$ Nm_i - Nm'_i $
			$x_i$	$m_i$	$m_i/n$	$m'_i$	$N m_i$	$N m'_i$	
1	0,12385	0,168	0,145	8	0,10	5,03205	8	5,03205	2,9679
2	0,168082	0,212	0,190	8	0,10	11,9647	16	16,9967	0,9967
3	0,212314	0,256	0,234	27	0,34	18,7476	43	35,7443	7,2556
4	0,256546	0,30	0,278	14	0,18	19,3587	57	55,1031	1,8968
5	0,300778	0,345	0,322	12	0,1538	13,1733	69	68,2764	0,7235
6	0,345011	0,389	0,367	6	0,0769	5,90750	75	74,1839	0,8160
7	0,389243	0,433	0,411	2	0,0256	1,74581	77	75,9298	1,0701
8	0,433475	0,477	0,455	1	0,0128	0,34000	78	76,2698	1,7301
Эмпирическое распределение $x_j$ при хонинговании стальных деталей									
$X_{max}$	$X_{min}$	$W_c$	$f_c$	$d_c$	$n_c$	$\bar{X}_c$	$S_c$	$\lambda_c$	$P(\lambda)_c$
0,477	0,134	0,342	7	0,0489	40	0,272	0,0736	0,2770	0,99
№	Интервалы		$x_{ic}$	$m_{ic}$	$m_{ic}/n_c$	$m'_{ic}$	$N m_{ic}$	$N m'_{ic}$	
1	0,134882	0,183	0,159	5	0,125	3,293	5	3,29334	1,7066
2	0,18385	0,232	0,208	7	0,175	7,303	12	10,5969	1,4030
3	0,23283	0,281	0,257	11	0,275	10,40	23	21,0025	1,9974
4	0,28180	0,330	0,306	10	0,25	9,524	33	30,5269	2,4730
5	0,33078	0,379	0,355	4	0,1	5,600	37	36,1275	0,8724
6	0,37975	0,428	0,404	1	0,025	2,115	38	38,2433	0,2433
7	0,42873	0,477	0,453	2	0,05	0,513	40	38,7568	1,2431
Эмпирическое распределение $x_j$ при хонинговании чугунных деталей									
$X_{max}$	$X_{min}$	$W_u$	$f_u$	$d_u$	$n_u$	$\bar{X}_u$	$S_u$	$\lambda_u$	$P(\lambda)_u$
0,347	0,123	0,223	6	0,0372	35	0,2446	0,0551	0,3840	0,99
№	Интервалы		$x_{i u}$	$m_{i u}$	$m_{i u}/n_u$	$m'_{i u}$	$N m_{i u}$	$N m'_{i u}$	
1	0,12385	0,161	0,142	3	0,0857	1,6944	3	1,69449	1,3055
2	0,161112	0,198	0,179	3	0,0857	4,7163	6	6,41088	0,4108
3	0,198374	0,235	0,217	11	0,3142	8,3169	17	14,7278	2,2721
4	0,235637	0,272	0,254	7	0,2	9,2918	24	24,0196	0,0196
5	0,272899	0,310	0,291	5	0,1428	6,5769	29	30,5966	1,5966
6	0,310161	0,347	0,328	6	0,1714	2,9493	35	33,5459	1,4540



**Выводы.**

1. Из значений табл.4.3 следует, что по критерию Колмогорова ( $P(\lambda) > 0,05$ ) во всех трех случаях имеет место закон нормального распределения;

2. Размах среднеарифметических значений по трем случаям составляет 0,0274. Поскольку это на порядок меньше по сравнению с размахом всей выборки эмпирического распределения величин  $x$ , то можно утверждать, что отсутствует функциональная зависимость между значениями  $x$  и свойствами обрабатываемого материала.

Из пунктов 1 и 2 следует, что при выборе габаритных размеров трапецеидальных брусков для хонингования глухих отверстий необходимо величину средней линии трапеции приравнять к расчетному значению ширины брусков, определенной для случая хонингования сквозных отверстий (по эмпирическому графику [42] и формуле (2)) а отношение оснований трапеции  $\varepsilon = V_1/V$  определять экспериментальным путем.

Остановимся на следующей схеме обработки, при которой физико-механические свойства связки по длине режущих элементов выполнены переменными, что обуславливает соответствующее нивелирование темпа размерного износа по длине режущих элементов [1].

В этом изобретении использована связка на основе эпоксидной смолы с отвердителем, а переменность механических свойств связки достигается за счет соответствующего процентного соотношения смолы и отвердителя. Недостатком является то, что для создания переменной износостойкости целенаправленно уменьшаются усилия удержания алмазных зерен в связке, что приводит к повышенному расходу последних. Следующим недостатком является то, что создание переменной износостойкости возможно за счет связки на основе эпоксидной смолы с отвердителем и проблематично – за счет других типов связок.

Таким образом технологические возможности при применении данного инструмента ограничены, как по перечню обрабатываемых материалов, так и по диапазону режимов обработки.

Альтернативой указанным выше способам хонингования, является схема, при которой переменные свойства по износостойкости по длине режущих элементов достигаются за счет переменности физико-механических свойств алмазных зерен.

На рис. 4.6 схематично представлена конструкция режущего элемента, алмазосносный слой которого состоит из двух (возможно и более двух как по ширине, так и по длине) частей, которые отличаются физико-механическими свойствами, а именно, прочностью алмазных зерен или, что тоже самое марками алмазов: в верхней части – высокопрочные алмазы марки АСВ (удельный расход –  $q_1 \approx 1,2$  мг/г), в нижней части – природные алмазы (удельный расход –  $q_2 \approx 0,5$  мг/г).

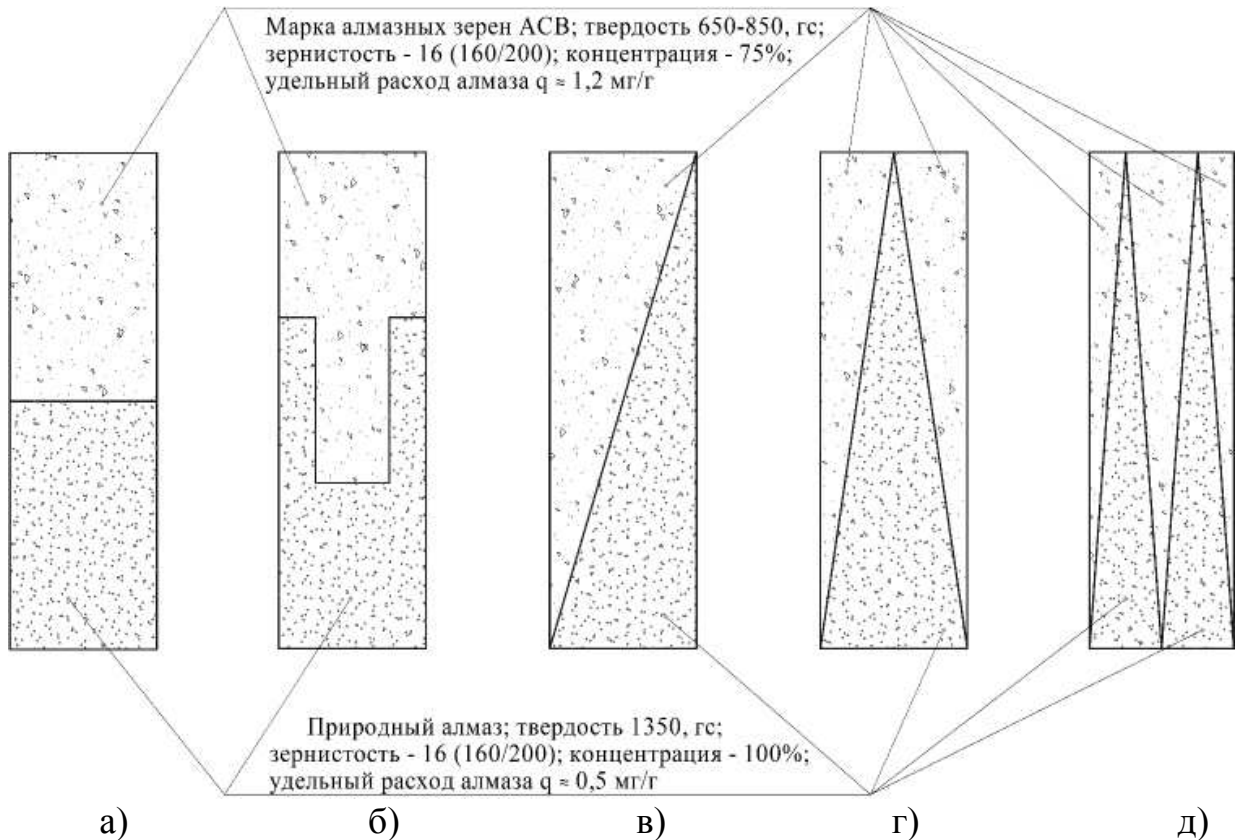


Рис. 4.6 Конструкции режущего элемента с переменными физико-механическими свойствами алмазных зерен по длине

Величина удельного расходов получены при хонинговании гильз цилиндров двигателей Д50 из закаленного чугуна (стр. 12-13[80]).

Такая конструкция инструмента в которой режущие элементы выполнены с переменными по их длине свойствами по износостойкости (по

аналогии с режущими элементами с переменной концентрацией алмазных зерен, либо трапецеидальной формы), обеспечит соответствующее нивелирование темпа размерного износа по длине режущих элементов.

Диапазон изменения твердости природных и синтетических алмазов меняется, в зависимости от марки и зернистости от 130 до 2452 гс. Следовательно, в достаточно широком диапазоне экспериментально можно подобрать такое соотношение твердостей верхней и нижней частей бруска, которое обеспечило бы требуемую точность формы обрабатываемых глухих отверстий.

При этом, поскольку число режущих зерен по длине режущих элементов неизменно (зернистость и концентрация в верхней и нижней части одинаковы), то и условия съема припуска по длине режущих элементов, также будут одинаковыми ( $a_z/\rho = \text{const}$ ).

**Вывод.** Способ обработки, включающий использование режущих элементов с переменными физико-механическими свойствами по их длине, с одной стороны, обеспечивает при обработке глухих отверстий компенсацию конусности, которая генерируется асимметрией перебегов и, с другой стороны, возможность обработки с обеспечением  $a_z/\rho = \text{const}$ .

Варьируя же суммарной шириной брусков можно обеспечить оптимальное значение величины  $a_z/\rho$ .

#### **4.2. Разработка способа хонингования за счет изменения продольной ориентации режущих элементов**

Известен способ хонингования, разработанный в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) [78] в котором, в цикле обработки осуществляется изменение продольной ориентации детали. Схема реализации этого способа изображена на рисунке 4.7. Цикл хонингования в данном способе разделяют как минимум на два и более подциклов, в каждом из которых обработка отверстия осуществляется с разных

сторон. Такой прием обеспечивает более равномерный контакт рабочей поверхности брусков со всеми участками обрабатываемого отверстия.

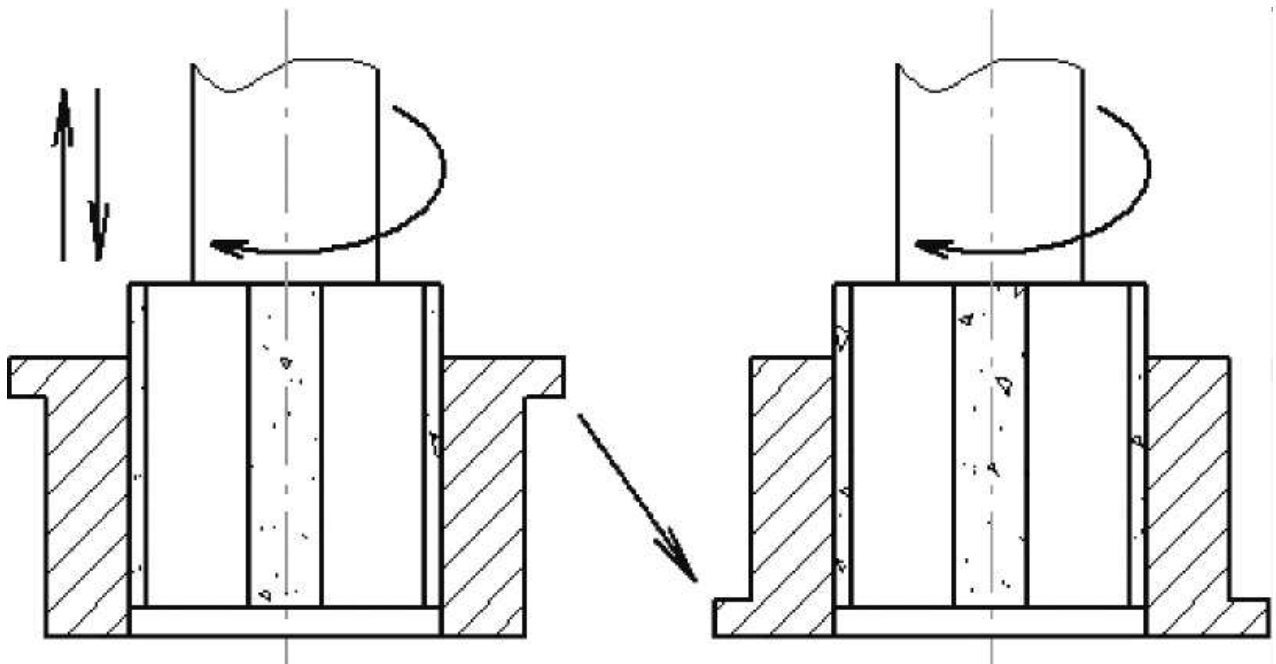


Рис. 4.7 Схема хонингования по методу взаимной правки

В результате существенно уменьшается копирование исходной погрешности геометрической формы обрабатываемого отверстия инструментом и наоборот. За счет эффекта взаимной правки интенсифицируется исправление исходной погрешности формы отверстия и рабочей части хонинговальной головки. Кроме того, при хонинговании отверстия с двух сторон уменьшается влияние погрешности наладки, например, неодинакового перебега брусков на точность геометрической формы обрабатываемого отверстия.

На основе приведенного выше известного способа хонингования разработан новый способ хонингования [58], в котором отличительной особенностью является то, что схема взаимной правки в контакте инструмент – деталь реализуется за счет периодического изменения продольной ориентации не детали, а режущих элементов инструмента.

На рис. 4.8 а, б, в, схематично представлены продольные и поперечные разрезы конструкций инструментов для реализации способа соответственно:

- с промежуточным клиновидным элементом в виде деформируемой в радиальном направлении, втулки;

- с промежуточными клиновидными элементами, которые установлены между каждым алмазонасным элементом и иглой разжима;
- с двумя одинаковыми, встречно ориентированными опорными клиновыми поверхностями на алмазонасных элементах.

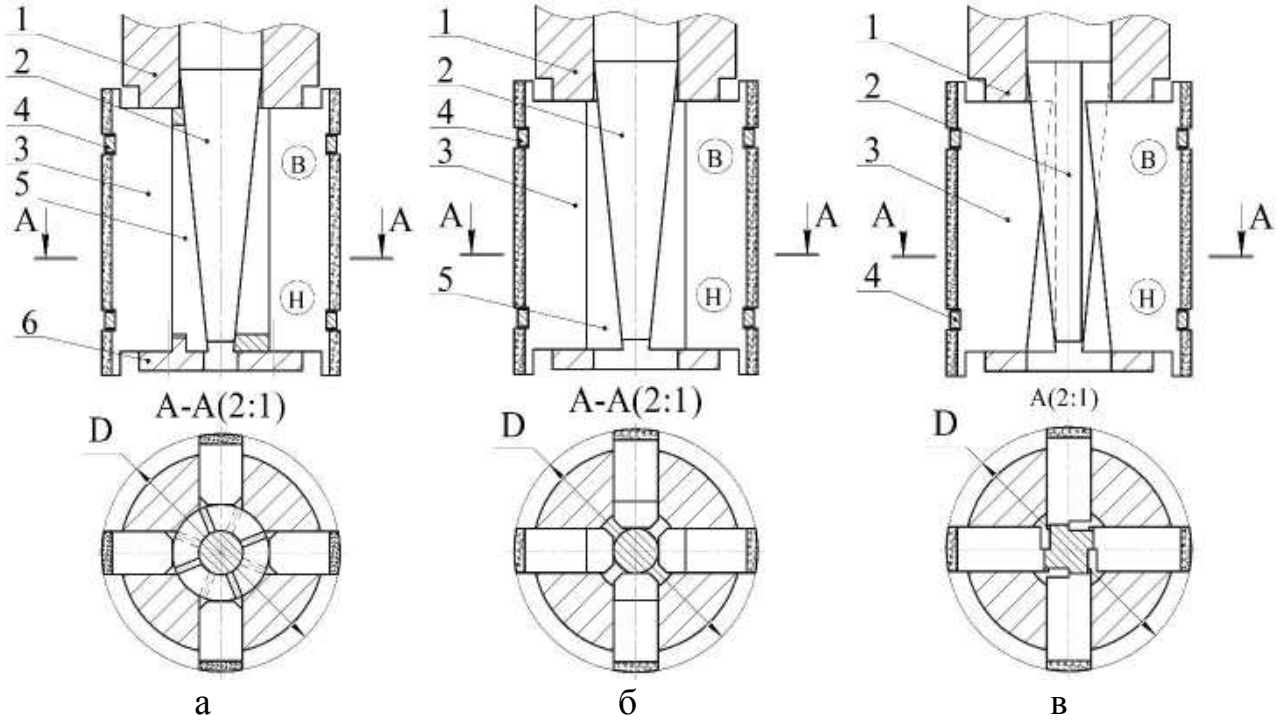


Рис. 4.8 Продольные и поперечные разрезы конструкций инструментов

На рис. 4.9, 4.10 и 4.11 изображены схемы контактирования иглы разжима и алмазонасных элементов (а – до переустановки и б – после переустановки) соответственно в конструкциях инструментов на 4.6 а, б, в.

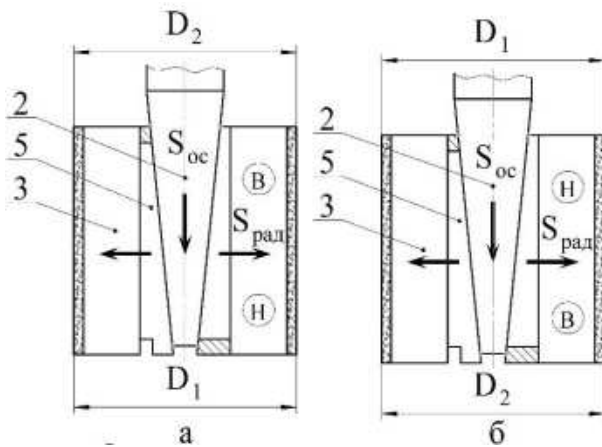


Рис. 4.9

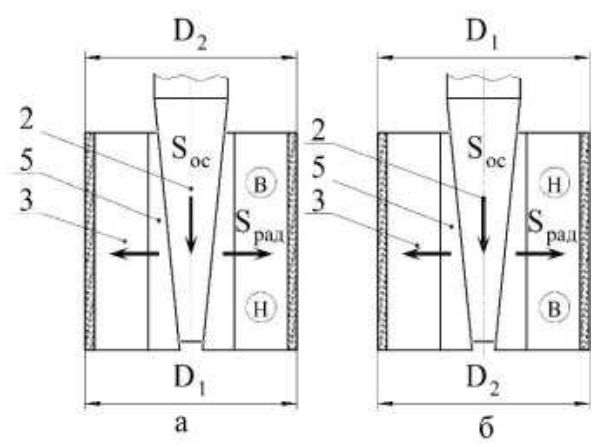


Рис. 4.10

На рис. 4.12 изображена развертка промежуточного клиновидного элемента 5 в виде деформируемой в радиальном направлении втулки в конструкции инструмента на 4.6 а.

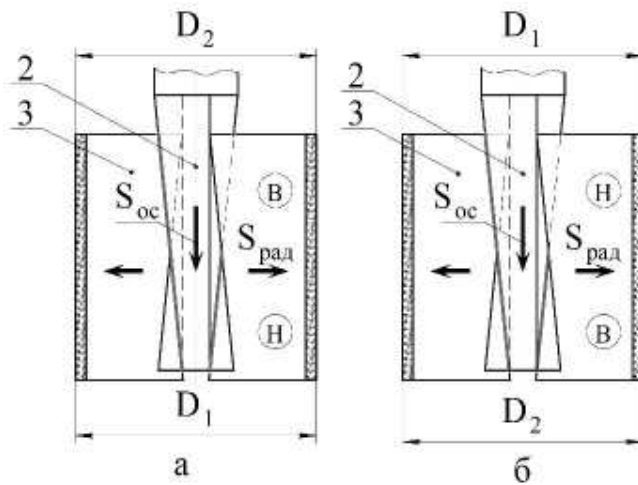


Рис. 4.11

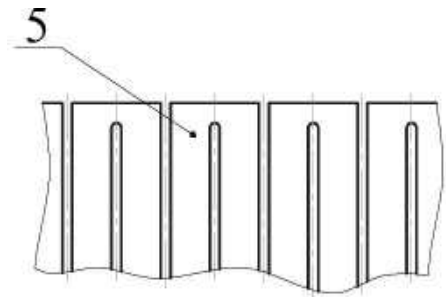


Рис. 4.12

Обозначения на всех фигурах идентичны.

Инструменты для хонингования (4.8 а, б, в) состоят из корпуса 1, в котором с возможностью продольного перемещения посредством механизма радиальной подачи станка (на фиг. не изобр.) установлена игла разжима 2. В продольных пазах корпуса с возможностью радиального перемещения установлены подпружиненные пружинами 4 алмазосные элементы 3. При этом алмазосные элементы установлены с возможностью контактирования своей рабочей опорной поверхностью, непосредственно (4.8 в), либо через промежуточный клиновидный элемент 5 (4.8 а, б), с рабочей опорной клиновидной (конической) поверхностью иглы разжима 2. Промежуточный клиновидный элемент на 4.8 а является общим для всех алмазосных элементов, а на 4.8 б, промежуточный клиновидный элемент выполнен в виде отдельных колодок, каждая из которых контактирует с собственным алмазосным элементом.

Инструмент работает следующим образом. В исходном положении инструмент находится вне хонингуемого отверстия; игла разжима 2 находится в крайнем верхнем (по рис.) положении и, соответственно, алмазосные элементы 3 сжаты пружинами 4. Инструмент вводится в обрабатываемое отверстие, и включением соответствующих приводов осуществляется

возвратно-поступательное, вращательное и ускоренные радиальные перемещения алмазонасных элементов 3. В момент достижения контакта алмазонасных элементов с обрабатываемой поверхностью ускоренное радиальное перемещение алмазонасных элементов системой управления станка переключается на рабочее перемещение. При этом из-за конструктивных особенностей глухих отверстий возвратно-поступательное перемещение осуществляется с односторонним перебегом. Таким образом, осуществляется съём припуска. По окончании съёма припуска инструмент выводится из отверстия в исходное крайнее положение. В этом положении осуществляют переустановку алмазонасных элементов, меняя их ориентацию на противоположную. Далее осуществляется хонингование следующей детали.

Период переустановки режущих элементов можно осуществлять после каждой детали, либо после обработки партии деталей, величина которой регламентируется разностью темпа радиального размерного износа алмазонасных элементов по длине и допуском на геометрическую погрешность по длине хонингуемого отверстия. Разработанный способ не исключает возможности переустановки режущих элементов внутри цикла обработки отдельной детали. Однако, следует заметить, что такие случаи могут возникнуть при сравнительно малых допусках и сравнительно большой разности темпов износа алмазонасных элементов по длине, что на практике встречается крайне редко.

Преимущества разработанного способа представлены в следующем параграфе.

#### 4.2.1 Сравнительный анализ эффективности и технологических возможностей известного и разработанного способов

1. Непосредственно из схемы реализации известного способа (рис. 4.7) следует, что областью применения этого способа является хонингование только сквозных отверстий.

Разработанный же способ применим как для сквозных, так и для глухих отверстий. При этом, в процессе хонингования глухих отверстий с односторонним перебегом (в зоне противоположной дну обрабатываемого отверстия) за время обработки одной детали (или партии деталей) рабочая часть алмазоносных элементов неравномерно изнашивается по длине. В меньшей степени изнашивается та часть, где имеет место перебег и в большей – где перебег отсутствует. То есть, на рабочей части инструмента формируется погрешность формы в продольном сечении в виде конусообразности, которая трансформируется в соответствующую погрешность обрабатываемого отверстия (раздел. 2 табл. 2.1 строка 4). После переустановки менее изношенная и более изношенная части меняются местами. При обработке следующей детали (или следующей партии деталей) ранее более изношенная часть изнашивается менее интенсивно, а ранее менее изношенная часть – более интенсивно. Таким образом, переустановка приводит к автоматическому выравниванию темпа износа по длине рабочей части алмазоносных элементов (эффект взаимной правки) и, соответственно, повышается геометрическая точность хонингуемого отверстия в продольном сечении.

2. При реализации известного способа предполагается, что при изменении продольной ориентации отверстия детали пространственное положение оси обрабатываемого отверстия остается неизменным, а торцы меняются местами. Если эти условия отсутствуют, то необходимо применение специально спроектированных приспособлений, которые обеспечивали бы постоянство положения отверстия независимо от его ориентации, что в ряде случаев либо проблематично, либо невозможно. В этом контексте, по конструктивным признакам, номенклатура обрабатываемых деталей с сквозными отверстиями существенно ограничена.

В инструменте, реализующем разработанный способ, опорные поверхности разжимного и режущих элементов, либо разжимного, режущих и промежуточных элементов выполнены таким образом, что при смене



ориентации режущих элементов ориентация режущей поверхности последних в радиальном и продольном направлениях занимает одно и то же место.

В отличие от известного способа такое конструктивное исполнение инструмента в разработанном способе обуславливает инвариантность в применении последнего по отношению к конструктивным признакам обрабатываемых деталей.

3. Реализация известного способа с изменением продольной ориентации отверстия детали (один или несколько раз в течении цикла) обуславливает неизбежность появления геометрических погрешностей, обусловленных перебазируем и перезакреплением детали.

В разработанном способе отсутствует перебазирование и перезакрепление детали и, соответственно, отсутствует возникновение оговоренных выше геометрических погрешностей. Погрешности же возникающие при смене ориентации режущих элементов в разработанном способе на порядок меньше, чем в известном при смене ориентации детали. Это обусловлено тем, что опорные поверхности разжимного и режущих элементов, либо разжимного режущих и промежуточных элементов инструмента, выполнены с существенно большей точностью, чем технологические базовые поверхности хонингуемых деталей. Кроме того, при длительной работе инструмента имеет место взаимная притирка указанных опорных поверхностей, которая направлена на нивелирование величины погрешностей, связанных со сменой ориентации режущих элементов.

4. Изменение продольной ориентации детали внутри цикла обуславливает разделение общего цикла как минимум на два и более подциклов, в каждом из которых обработка отверстия осуществляется с разных сторон. При этом, при переходе от одного подцикла к другому имеет место прерывание общего цикла обработки, что приводит к возникновению нежелательных переходных процессов. В частности, необходимо уменьшить диаметральный размер инструмента, и соответственно снять натяг в системе, выключить приводы станка и, далее, осуществить вывод инструмента из зоны обработки. После,

необходимо выполнить смену ориентации детали, ввести инструмент в зону обработки с одновременным включением приводов станка, восстановить натяг в системе и продолжить цикл. Все это существенно увеличивает вспомогательное время на операцию хонингования.

Кроме того, во время переходных процессов между подциклами, имеет место неуправляемый съём припуска, что обуславливает необходимость увеличения общего припуска на хонингование и в большинстве случаев вносит дополнительные геометрические погрешности, для нивелирования которых также необходимо увеличение общего припуска.

В разработанном способе изменение продольной ориентации режущих элементов внутри цикла, как отмечалось выше, имеет место в исключительных случаях. В подавляющем большинстве случаев, изменение ориентации режущих элементов осуществляется между циклами после обработки каждой детали, либо после обработки существенной партии деталей.

Из изложенного следует вывод о том, что увеличение трудоемкости обработки связанная с переориентацией в известном способе существенно больше, чем увеличение трудоемкости в разработанном способе.

5. В разработанном способе существенно меняются условия обработки. Суть в следующем. При переустановке фронтальные (по отношению к вектору окружной скорости) части режущих элементов становятся тыльными и, соответственно, тыльные части – фронтальными, что приводит к повышению режущей способности последних. Это обусловлено следующим. Во-первых, в работу вступают экранируемые ранее режущие зерна. Во-вторых, у затупленных ранее зерен, при смене ориентации, начинают резать противоположные острые грани. И в-третьих, улучшаются условия эвакуации шлама из пространства между зернами.

### **Выводы.**

1. Технологические возможности разработанного способа существенно шире, чем технологические возможности известного.

2. В сравнении с традиционными способами оба способа характеризуются увеличением трудоемкости обработки. При этом, увеличение трудоемкости в известном способе существенно больше, чем в разработанном.

3. В обоих способах имеет место два встречных явления:

- повышение точности обработки за счет нивелирования неравномерности износа по длине режущих элементов (эффекта взаимной правки);

- уменьшение точности обработки обусловленная возникновением геометрических погрешностей при переориентации. При этом, уменьшение точности в известном способе существенно больше, чем в разработанном.

### **4.3 Разработка способа хонингования на основе компенсации неравномерности износа по длине режущих элементов**

В первом разделе были обозначены несколько наиболее перспективных способов и конструкций инструментов для хонингования глухих отверстий. Один из этих способов, а именно способ при котором повышение точности обработки повышается за счет компенсации неравномерности размерного износа по длине режущих элементов посредством поворота последних более детально рассмотрим ниже.

#### **4.3.1 Анализ работоспособности конструкции инструмента с фиксированными осями поворота режущих элементов**

На рис.4.13 представлена схема конструкции известного инструмента [20], изображенного на рис. 1.11 и 1.12 при условии оптимального варианта взаимного расположения иглы разжима и колодки с алмазоносным слоем в момент окончания съема припуска  $z$  в отверстии изделия 9. При этом рабочая часть иглы разжима контактирует (сопрягается) с опорной поверхностью колодки по прямой линии  $AB$ , а рабочая поверхность алмазоносного слоя контактирует с обработанной поверхностью изделия по образующей  $CD$ . Этот

вариант является необходимым условием для достижения высокой геометрической точности обрабатываемого отверстия в продольном сечении.

На рис. 4.14 изображено взаимное расположение инструмента и обрабатываемого изделия в момент начала съема припуска с учетом условия оптимальности их расположения в момент окончания съема припуска (рис. 4.13). При этом рабочая (коническая, либо клиновая) часть иглы разжима контактирует (сопрягается) с опорной поверхностью колодки в точке В (а не по линии АВ). Рабочая поверхность алмазного слоя контактирует с образующей необработанной поверхности отверстия изделия в точке М (а не по линии MN).

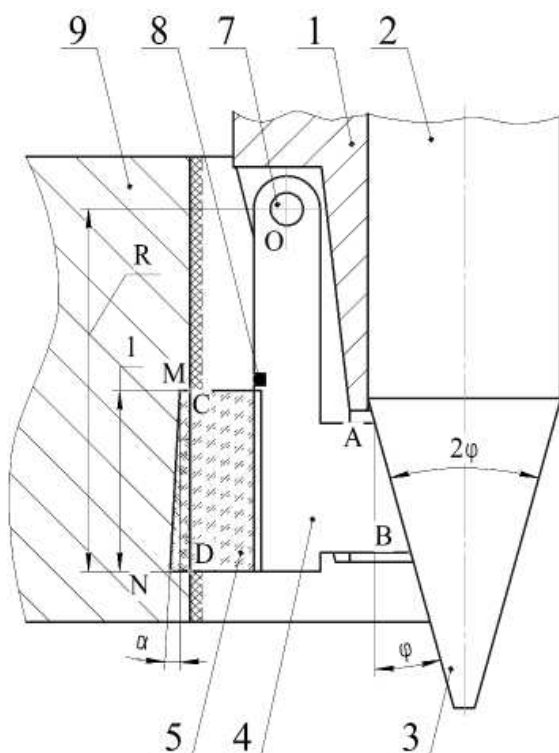


Рис. 4.13 Схема известной конструкции инструмента с оптимальным вариантом взаимного расположения подвижных частей инструмента и обрабатываемого изделия в момент окончания съема припуска

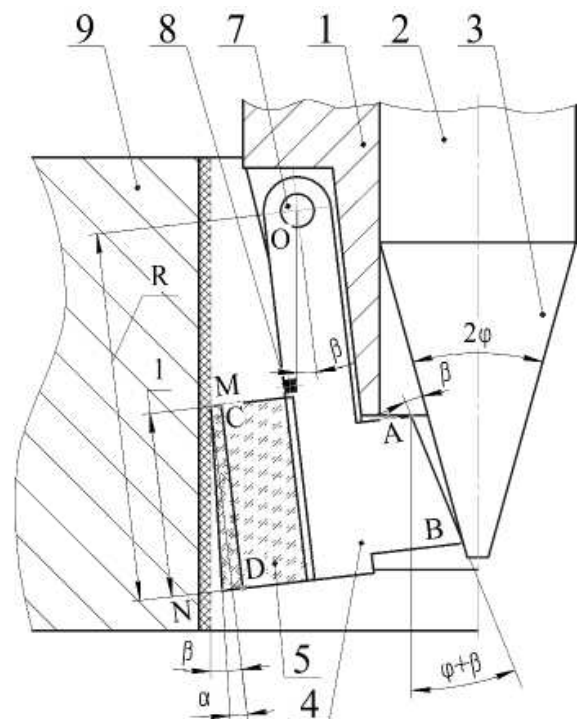


Рис. 4.14. Схема взаимного расположения обрабатываемого изделия и подвижных частей инструмента, изображенного на рис.2, в момент начала съема припуска

Рассмотрим возможные варианты работы инструмента.

До начала обработки определяют положение иглы разжима (положение алмазных элементов), соответствующее требуемому диаметральному

размеру отверстия в хонингуемых изделиях. Это может быть осуществлено, например, по эталонной детали. Затем переводят инструмент в исходное положение.

В исходном положении инструмент находится вне хонингуемого отверстия; игла разжима находится в крайнем верхнем положении (по рис.) и, соответственно, колодки с алмазоносным слоем сжаты пружиной до минимального диаметрального размера. Инструмент вводится в обрабатываемое отверстие, и посредством соответствующих приводов осуществляется возвратно-поступательное, вращательное и ускоренные радиальные перемещения режущих элементов. В момент достижения контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью системой управления станка ускоренная подача режущих элементов переключается на рабочую подачу и, далее, осуществляется съём припуска. По окончании съёма припуска, инструмент выводится из отверстия в исходное крайнее положение.

При этом, в процессе съёма припуска алмазоносный слой неизбежно изнашивается (на рис. 4.13. изношенный слой обозначен контуром CDMN) и в случае хонингования глухих отверстий, в связи с асимметричностью перебега, нижняя часть алмазоносного слоя (величина  $DN = \Delta_H$ ) изнашивается интенсивней, чем верхняя (величина  $CM = \Delta_B$ ). Эта разность износов, с учетом длины алмазоносного слоя  $l$ , определяет величину необходимого компенсационного угла доворота  $\alpha$  за время обработки одного отверстия.

Из рис. 4.13 и 4.14 непосредственно видно, что, по мере съёма припуска и износа алмазоносного слоя и в зависимости от конструктивного исполнения инструмента, возможны четыре варианта контакта рабочей части иглы разжима с опорной частью колодки с алмазоносным слоем. Это – контакт либо только в точке  $B$ , либо только в точке  $A$ , либо в начале съёма припуска контакт в т.  $B$ , а в конце съёма припуска – контакт по линии  $AB$  или в т.  $A$ .

Из изложенного выше следует, что при равномерном перемещении иглы разжима, радиальная подача каждого режущего зерна будет разной и переменной, а в момент перехода контакта от точки  $B$  к точке  $A$  будет иметь

место скачкообразное изменение радиальной подачи. Иными словами, режущие зерна будут либо перегружены, либо недогружены, т.е. режущие зерна будут работать в режиме, отличном от оптимального.

Из рис. 4.13 и 4.14 также непосредственно видно, что в момент начала обработки отсутствует полное прилегание режущего элемента и образующей необработанного отверстия, т.е. изначально съём припуска осуществляется только частью режущих зерен в окрестности т. *M*.

Далее зона износа будет смещаться от т. *M* к т. *N*, что обусловит бочкообразный износ режущих элементов. В результате этого бочкообразная форма инструмента будет формировать соответствующую геометрическую погрешность обрабатываемого отверстия и, по мере осуществления радиальной подачи, число режущих зерен будет увеличиваться, но полное прилегание образующей режущего элемента и образующей обрабатываемого отверстия при этом недостижимо, то есть будет иметь место частичный контакт режущих элементов с обрабатываемой поверхностью.

Предположим, что можно сконструировать инструмент и организовать процесс съема припуска таким образом, чтобы фактический угол поворота режущих элементов  $\beta$ , который, по сути, является производным от величины снимаемого припуска и величины среднего удельного износа алмазоносного слоя, был равен требуемому компенсационному углу доворота  $\alpha$ .

Это оптимальное условие съема припуска, при котором имеет место полное прилегания образующих режущего элемента и обрабатываемого отверстия от начала и до конца съема припуска.

На рис. 4.15 представлена расчетная схема оптимального варианта съема припуска известным инструментом.

Примечание. В этом параграфе обозначения на рис. 4.13, 4.14 и 4.15 идентичны.

$R$  – значение вертикальной координаты оси поворота режущих элементов;

$l$  – длина алмазоносного слоя;

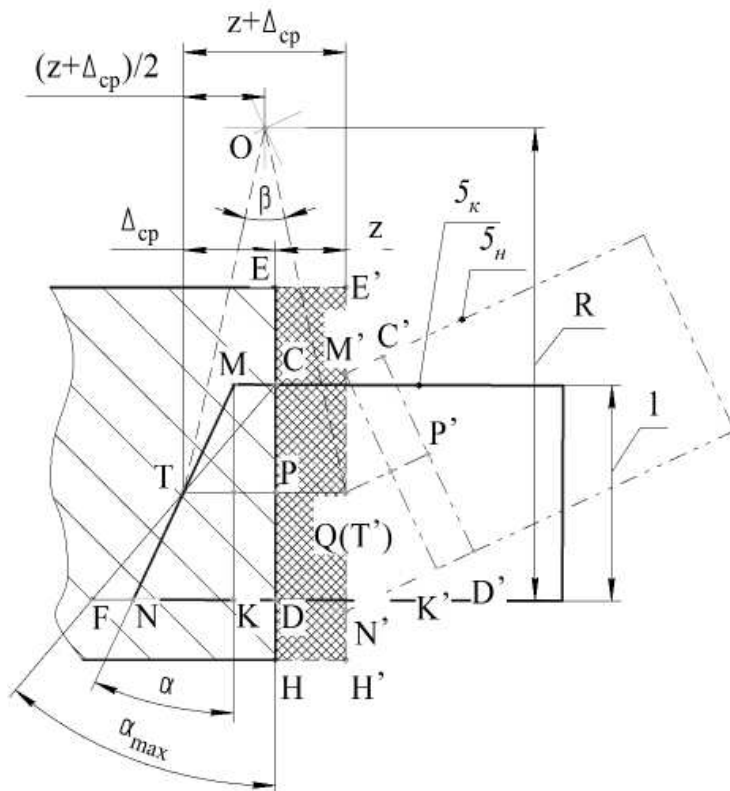


Рис. 4.15. Расчетная схема оптимального варианта взаимного расположения алмазного слоя инструмента и обрабатываемого изделия в момент начала съема припуска ( $5_n$ ) и в момент окончания съема припуска ( $5_k$ ).

непосредственно видно, что при изменении положения координаты оси поворота режущего элемента  $O$ , меняется и величина угла  $\beta$ , то есть, если определено значение угла  $\alpha$ , то можно обеспечить равенство углов  $\alpha$  и  $\beta$ , например, за счет соответствующего конструктивного выбора координат оси поворота  $O$  режущего элемента. Непосредственно, элементарными геометрическими построениями можно показать, что варьирование координатой оси поворота  $O$  в горизонтальном направлении малоэффективно.

На рис. 4.15 ось поворота  $O$  режущего элемента по горизонтали зафиксирована таким образом, что делит пополам сумму средних величин снимаемого припуска и удельного износа алмазного слоя. В этом случае ввиду малости углов  $\alpha$  и  $\beta$ , с целью упрощения математических выкладок,

$2\varphi$  – угол при вершине рабочей части (конической, либо клиновидной) иглы разжима;

$\alpha$  – требуемый компенсационный угол доворота за время съема припуска;

$\beta$  – фактический угол поворота режущих элементов, за время съема припуска;

$z$  – снимаемый припуск;

$\Delta_{CP}$  – средний удельный износ режущих элементов;

$\alpha_{max}$  – предельное значение компенсационного угла доворота.

Из рис. 4.14 и 4.15

возможна замена дуг окружностей, по которым перемещаются режущие зерна, на хорды этих окружностей.

Непосредственно из геометрических построений рис.6 следует, что

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{(z + \Delta_{CP})/2}{(R - l/2)}, \quad (4.3)$$

$$\operatorname{tg} 2 \cdot \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta_H - \Delta_B}{l} = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}. \quad (4.4)$$

Решая уравнения (4.4) относительно  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , получим

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = -\frac{l}{\Delta_H - \Delta_B} \pm \sqrt{\frac{l^2}{(\Delta_H - \Delta_B)^2} - 1}. \quad (4.5)$$

Из условия  $\alpha = \beta$  следует

$$-\frac{l}{\Delta_H - \Delta_B} \pm \sqrt{\frac{l^2}{(\Delta_H - \Delta_B)^2} - 1} = \frac{(z + \Delta_H - \Delta_B)/2}{(R - l/2)}. \quad (4.6)$$

Отсюда

$$R = \frac{\frac{1}{\Delta_H - \Delta_B} \cdot \left( -\frac{l}{2} \pm \sqrt{l^2 - (\Delta_H - \Delta_B)^2} \right) + \frac{l \cdot \left( z + \frac{\Delta_H - \Delta_B}{2} \right)}{2}}{z + \frac{\Delta_H - \Delta_B}{2}}. \quad (4.7)$$

Таким образом, получено уравнение для определения в известном инструменте значения вертикальной координаты угла поворота режущего элемента, при котором обеспечивается оптимальный сьем припуска. Непосредственно из этого уравнения (и из геометрических построений рис. 4.15), видно, что конструктивный параметр R при фиксированных значениях l и z (и учета условия  $\alpha = \beta$ ) является производным и зависит от значений  $\Delta_H$  и  $\Delta_B$ , которые, при конкретных условиях обработки, могут быть определены экспериментально. Если перейти к предельному максимальному значению разности  $\Delta_H - \Delta_B$  ( $\Delta_H \rightarrow \max$ ;  $\Delta_B \rightarrow 0$ ), то получим максимальное значение угла  $\alpha_{\max}$ , которое соответствует минимальному значению конструктивного параметра R. В этом случае, если величину разности  $(\Delta_H - \Delta_B)$  заменить величиной  $2\Delta_{CP}$  (на рис. 4.15 – отрезок  $FD = 2TP = 2\Delta_{CP}$ ), то можно воспользоваться инвариантными экспериментальными данными по удельному



среднему износу режущих элементов. В данной работе воспользуемся данными, которые получены при черновом и чистовом хонинговании гильз из легированного чугуна табл. 4.4 (2, стр. 148, табл. 6 [82]).

Таблица. 4.4

Таблица экспериментальных данных

Деталь, материал, размер	Операция	Характеристика брусков	Припуск, мм	Режимы резания			Шероховатость, Ra	Стойкость комплекта брусков в деталях, шт
				$V_{в.п.}$	$V_{кр}$	Р, мПа		
				м/мин				
Гильза, легированный чугун, HRCэ 45, Ø145 <sup>+0,05</sup> , L = 280	1	АСВ 160/125 М1	0,03 – 0,17	18	34	$P_1 = 0,4$ $P_2 = 2,5$ $P_1 = 0,4$	2,5	800 – 600
	2	АСМ 20/40 М1	0,01	9	49	–	0,32	1500 – 2000

Примечание – размеры брусков 125x8x3,5x1,5 R72.5.

Исходя из этих данных, определим ориентировочные значения  $\Delta_{cp}$ .

При черновом хонинговании  $\Delta_{cp} = \frac{1,5}{800} = 0,001875$  мм/дет.

При чистовом хонинговании  $\Delta_{cp} = \frac{1,5}{1500} = 0,001$  мм/дет.

Подставляя эти данные в уравнение (4.7) получим ориентировочные значения вертикальных координат углов поворота режущего элемента, соответственно в конструкциях головок для черного и чистового хонингования:  $R_{черн.} = 330299,9$  мм;  $R_{чист.} = 5952443$  мм.

Реальные значения R (с учетом того, что  $\alpha \ll \alpha_{max}$ ) будут существенно больше, предположительно на порядок и более. Очевидно, что конструкция с длиной рабочей части более 330 метров неприемлема.

### Выводы.

1. В известную схему хонингования и конструкцию инструмента для реализации этой схемы заложена прогрессивная идея компенсации неравномерности размерного износа по длине режущих элементов по мере съема припуска. Это осуществляется посредством реализации переменной радиальной подачи по длине режущих элементов за счет их поворота относительно фиксированной оси.

2. Известная конструкция не может обеспечить оптимальный процесс съема припуска, а именно производительный съем припуска всеми режущими зернами по длине режущих элементов за время цикла. Это обусловлено тем, что величины радиальной подачи и компенсационного угла поворота режущих элементов функционально взаимосвязаны.

На основе выводов п. 1 и 2 можно сформулировать обобщающий вывод о том, как создать более совершенную схему хонингования и конструкцию инструмента для реализации этой схемы с целью повышения эффективности процесса хонингования глухих отверстий.

Суть в следующем. Известную схему хонингования следует изменить таким образом, чтобы конструктивно обеспечить функциональную независимость соотношения величины радиальной подачи и величины компенсационного угла поворота режущих элементов.

#### 4.3.2. Разработка способа хонингования глухих отверстий и инструмента для его реализации

В этом параграфе представлен новый способ хонингования [57] и инструмент для его реализации, в котором совмещены прогрессивные свойства известных способов и инструментов для их реализации.

Инструмент рис. 4.16 состоит из корпуса 1, в продольных радиальных пазах которого установлены подвижно и с возможностью контактирования с иглой разжима, подпружиненные пружиной 4 режущие элементы 3. Каждый режущий элемент выполнен с двумя, разнесенными по длине, опорными (например, цилиндрическими с радиусами кривизны  $r_1$  и  $r_2$  и центрами радиусов кривизны  $O_1$  и  $O_2$ ) поверхностями и установлен с возможностью радиального перемещения и поворота (например, вокруг оси  $O$ ). Соосно корпусу, установлена с возможностью продольного перемещения посредством механизма радиальной подачи станка (на фиг. не изображен) игла разжима 2. Рабочая часть иглы разжима выполнена с двумя разными по величине конусности (либо, по величине угла клина) и разнесенными по длине рабочими опорными частями,

каждая из которых контактирует с соответствующей опорной поверхностью режущих элементов.

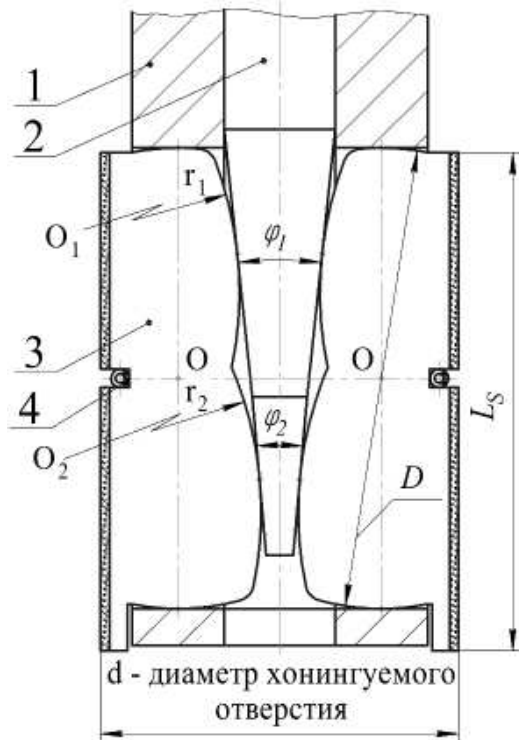


Рис. 4.16. Схема конструкции разработанного инструмента с двойным конусом разжима и с подвижными осями поворота режущих элементов

#### Работа инструмента.

До начала обработки, определяют положение иглы разжима (положение режущих элементов), соответствующее требуемому диаметральному размеру отверстия в хонингуемых изделиях. Это может быть осуществлено, например, по эталонной детали. Затем переводят инструмент в исходное положение.

В исходном положении инструмент находится вне хонингуемого отверстия; игла разжима 2 находится в крайнем верхнем положении (по фиг.) и, соответственно, режущие элементы 3 сжаты пружиной 4. Инструмент вводится в обрабатываемое отверстие, и посредством соответствующих

приводов осуществляется возвратно-поступательное, вращательное и ускоренные радиальные перемещения режущих элементов 3. В момент достижения контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью ускоренное радиальное перемещение режущих элементов системой управления станка переключается на рабочую подачу и осуществляется съём припуска. При этом съём припуска сопровождается соответствующим радиальным износом режущих элементов, который в связи с асимметричностью перебега характеризуется большей интенсивностью в нижней части режущих элементов по отношению к верхней части режущих элементов. По окончании съёма припуска, инструмент выводится из отверстия в исходное крайнее положение.

Однако, при осевом перемещении иглы разжима ее верхняя опорная часть перемещает радиально верхние части режущих элементов с меньшей скоростью,

чем ее нижняя опорная часть нижние части режущих элементов. То есть, имеет место одновременно радиальная подача и дополнительный поворот режущих элементов вокруг осей  $O$  в продольных радиальных пазах корпуса. Дополнительный поворот выбирается таким образом, чтобы компенсировать разность износов соответственно верхней и нижней части режущих элементов. Это исключает формирование геометрической погрешности хонингуемого отверстия в виде конусности, то есть повышается точность обработки.

Требуемый дополнительный поворот  $\varphi$  определится из уравнения

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\Delta_2 - \Delta_1)/l, \quad (4.8)$$

где:  $l$  – длина режущих элементов;

$\Delta_2$  и  $\Delta_1$  соответственно величин средних радиальных износов по краям режущих элементов в продольном направлении.

В конкретных условиях хонингования параметр  $\varphi$  можно определить экспериментально. Для этого, достаточно обработать аналогичным известным инструментом (с углом  $\varphi_1$  при вершине рабочей части иглы разжима) партию пробных деталей. Затем непосредственно измерить величины радиального износа в крайних по длине режущих элементов точках  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$ . Если  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$  разделить на размер партии, то получим усредненные величины радиального износа в крайних точках по длине режущих элементов за время съема припуска на одной детали. То есть, получим соответственно величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ . Подставив значения этих величин и значение величины  $l$  в приведенную формулу, определим величину угла  $\varphi$ .

Обеспечение поворота на угол  $\varphi$  осуществляется за счет выполнения рабочей части иглы с углами при вершинах конусов на рабочей части  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При этом, при фиксированном значении угла  $\varphi_1$ , геометрически рассчитывают значение  $\varphi_2$  таким образом, чтобы за время съема припуска, при хонинговании глухого отверстия, режущие элементы радиально перемещаясь, повернулись бы на требуемый компенсационный угол  $\varphi$ .

Погрешность при определении экспериментальных величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , соответственно, величины  $\varphi$  может привести к формированию при хонинговании остаточной конусности на обрабатываемом отверстии. Однако, величина этой конусности существенно меньше (на порядок и более), чем в случае обработки без компенсационного поворота режущих элементов на угол  $\varphi$ . Это остаточная конусность может быть устранена за счет незначительной корректировки величины перебега режущих элементов в зоне, противоположной дну обрабатываемого отверстия.

### **Выводы.**

1. На основе анализа съема припуска известными схемами и конструкций инструментов для реализации этих схем, разработана более совершенная схема и конструкция инструмента для хонингования глухих отверстий.

2. Разработанная конструкция позволяет реализовать радиальную подачу режущих элементов, совмещенную с их компенсационным поворотом вокруг собственных осей. При этом последние установлены с возможностью радиального перемещения со скоростью радиальной подачи.

3. Отличительным признаком разработанной схемы является то, что предусмотрена возможность радиального перемещения осей поворота режущих элементов, что обеспечивает возможность реализации в широком диапазоне сочетания величин радиальной подачи и компенсационного поворота режущих элементов. Это позволяет реализовать схему хонингования при которой режущие зерна по длине режущих элементов участвуют в процессе резания полностью от начала и до конца съема припуска.

4. Выполнение рабочей части иглы разжима, в разработанной конструкции, с двумя разными по величине конусности (либо, по величине угла клина) и разнесенными по длине рабочими опорными частями конструктивно ограничивает величину суммарного хода иглы. Этот недостаток легко устраняется за счет наличия комплекта игл разжима с рабочими частями отличными по диаметру и длине и с идентичными углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . В этом случае возможно полное использование алмазоносного слоя.

### 4.3.3 Вывод уравнения для определения основных конструктивных параметров разработанного инструмента

Непосредственно из рис. 4.16 следует, что закон изменения угла поворота режущих элементов зависит от закона осевого перемещения иглы разжима и конструктивных параметров инструмента. На рис. 4.17 представлена схема для вывода указанной выше аналитической зависимости.

Для определенности примем, что рабочая часть иглы разжима выполнена в виде двух конусов соответственно с углами при вершинах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и образующими  $AC$  и  $CB$ .

Введем прямоугольную систему координат и свяжем ее с инструментом таким образом, что координата  $X$  проходит через ось поворота режущего элемента и по направлению совпадает с вектором радиальной подачи. Координата  $Y$  проходит через точку пересечения образующих конических поверхностей (точка  $C$ ), параллельна оси инструмента и направлена встречно вектору осевого рабочего перемещения иглы разжима.

Обозначения на схеме.

$S(t)$  – величина осевого перемещения иглы разжима за время рабочего хода режущих элементов.

$O$  – начало осей координат  $X$  и  $Y$ .

$O_1$  и  $O'_1$  – положения оси поворота режущего элемента соответственно в моменты времени до и после перемещения иглы разжима на величину  $S(t)$ .

$O_2$  и  $O'_2$  – положения центра радиуса кривизны верхней (по схеме) опорной (контактирующей с верхней конической поверхностью иглы разжима) поверхности режущего элемента соответственно в моменты времени до и после перемещения иглы разжима на величину  $S(t)$ .

$O_3$  и  $O'_3$  – положения центра радиуса кривизны нижней опорной (контактирующей с нижней конической поверхностью иглы разжима) поверхности режущего элемента соответственно в моменты времени до и после перемещения иглы разжима на величину  $S(t)$ .

$r_1$  и  $r_2$  – соответственно радиусы кривизны верхней и нижней опорных (например, цилиндрических либо, сферических) поверхностей режущего элемента.

$A$  и  $B$  – соответственно точки контакта верхней и нижней опорных поверхностей режущего элемента с соответственно верхней и нижней опорными поверхностями иглы разжима.

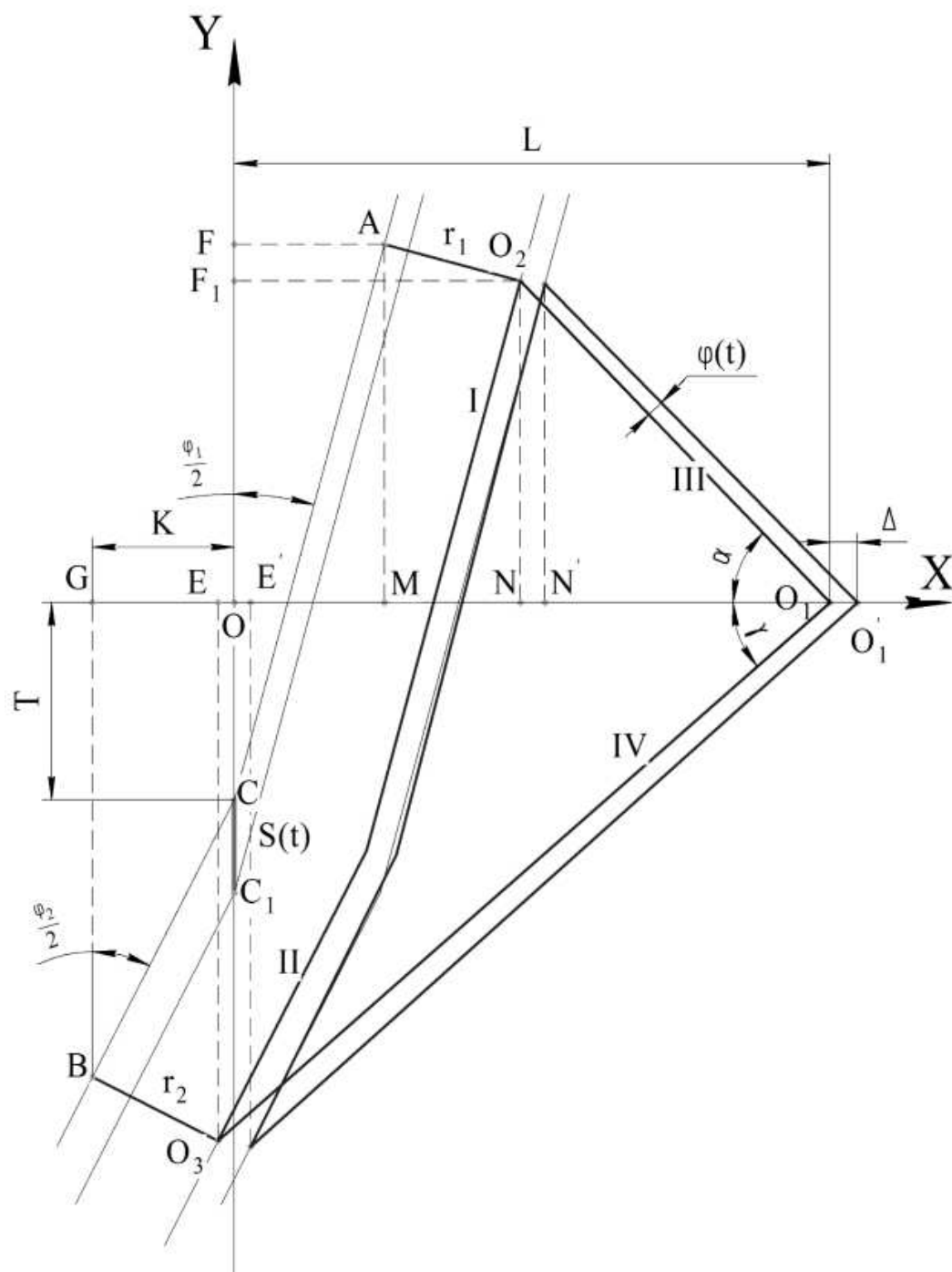


Рис. 4.17 Расчетная схема для вывода аналитической зависимости угла поворота режущих элементов и осевого перемещения иглы разжима с учетом величин конструктивных параметров инструмента

$\Delta$  – величина радиального перемещения оси поворота режущего элемента соответствующего перемещению иглы разжима на величину  $S(t)$ .

$\varphi(t)$  – величина угла поворота режущего элемента соответствующая перемещению иглы разжима на величину  $S(t)$ .

$$OC = T; OO_1 = L; O_1O_2 = L_1; O_2O_3 = L_2$$

Определим величины  $L_1$  и  $L_2$ .

Для этого запишем координаты точки  $A$  ( $x_A; y_A$ )

$$\begin{cases} x_A = AF = L - O_1N - MN = L - L_1 \cos \alpha - r_1 \cos \frac{\varphi_1}{2} \\ y_A = OF = OF_1 + F_1F = L_1 \sin \alpha + r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} \end{cases} \quad [4.9]$$

С другой стороны  $x_A = AF$

$$x_A = AF = (OF + T) \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \quad [4.10]$$

Подставим в выражение [4.10] значение  $OF$  из выражения [4.9]

$$x_A = AF = \left( L_1 \sin \alpha + r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} + T \right) \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \quad [4.11]$$

Приравнивая правые части значения  $x_A$  из выражения [4.9] и [4.11], запишем:

$$\left( L_1 \sin \alpha + r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} + T \right) \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} = L - L_1 \cos \alpha - r_1 \cos \frac{\varphi_1}{2} \quad [4.12]$$

Преобразуя и решая относительно  $L_1$ , получим:

$$L_1 = \frac{L - r_1 \cos \frac{\varphi_1}{2} - r_1 \sin \frac{\varphi_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} - T \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}} \quad [4.13]$$

Аналогично определим выражение для  $L_2$ .

Запишем координаты точки  $B$  ( $x_B; y_B$ ):

$$\begin{cases} x_B = -K = L - (L - OE) - EG = L - L_2 \cos \gamma - r_2 \cos \frac{\varphi_2}{2} \\ y_B = -(CQ + OC) = -\left( K \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} + T \right) = -(OP - PQ) = -\left( L_2 \sin \gamma - r_2 \sin \frac{\varphi_2}{2} \right) \end{cases} \quad [4.14]$$



Значение  $K$  из уравнения для  $x_B$  и подставим в уравнение для  $y_B$

$$\left( L_2 \cos \gamma + r_2 \cos \frac{\varphi_2}{2} - L \right) \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} + T = -L_2 \sin \gamma + r_2 \sin \frac{\varphi_2}{2} \quad [4.15]$$

Отсюда

$$L_2 = \frac{L \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} + r_2 \sin \frac{\varphi_2}{2} - r_2 \cos \frac{\varphi_2}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - T}{\sin \gamma + \cos \gamma \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \quad [4.16]$$

Запишем уравнения прямых I и II, которые соответственно параллельны образующим конических поверхностей (верхней и нижней) рабочей части иглы разжима и проходят соответственно через центры радиусов кривизны  $O_2$  и  $O_3$  до перемещения иглы разжима.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_I = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} - \left( T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} \right) \\ y_{II} = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \left( T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} \right) \end{array} \right. \quad [4.17]$$

При перемещении иглы разжима на величину  $S(t)$  прямые I и II переместятся в положение I' и II'. При этом уравнения прямых I' и II' запишутся так

$$y'_I = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} - \left( T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + S(t) \right) \quad [4.18]$$

$$y'_{II} = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \left( T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} + S(t) \right) \quad [4.19]$$

Далее запишем уравнения прямых III' и IV' которые проходят соответственно через ось поворота режущего элемента  $O_1$  и центры радиусов кривизны опорных поверхностей режущих элементов  $O_2$  и  $O_3$ .

$$y'_{III} = -x \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) + (L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) \quad [4.20]$$

$$y'_{IV} = x \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - (L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) \quad [4.21]$$

Определим координаты точек пересечения прямых I' и III' (точка  $O'_2$ ) и II' и IV' (точка  $O'_3$ ).

Координата x и y точки  $O'_2$  определяются из решения системы уравнений прямых I' и III'

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} - \left( T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + S(t) \right) \\ y = -x \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) + (L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) \end{cases} \quad [4.21]$$

Отсюда, приравняв правые части уравнений [4.21] и решая относительно x, получим

$$x(O'_2) = \frac{T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + S(t) + (L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t))}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t))} \quad [4.22]$$

Подставляя, значение  $x(O'_2)$  из соотношения [4.22] в первое уравнение системы [4.21] и преобразуя, получим

$$\begin{aligned}
 y(O'_2) &= \frac{\left( T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} \right) \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + S(t) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + (L + \Delta) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t))}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t))} - T - \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} - S(t) = \\
 &= \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) \cdot \left( (L + \Delta) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} - T - \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} - S(t) \right)}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t))} \quad [4.23]
 \end{aligned}$$

Аналогично определяются координаты  $x$  и  $y$  точки  $O'_3$  из решения системы уравнений прямых II' и VI'

$$\begin{cases}
 y = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \left( T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} + S(t) \right) \\
 y = x \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - (L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t))
 \end{cases} \quad [4.24]$$

Отсюда, приравняв правые части уравнений [4.24] и решая относительно  $x$ , получим

$$x(O'_3) = \frac{(L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - T - \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} - S(t)}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \quad [4.25]$$

Подставляя значение  $x(O'_3)$  из соотношения [4.25] в первое уравнение системы [4.24] и преобразуя, получим

$$\begin{aligned}
y(O'_3) &= \frac{(L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \left( T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} \right) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - S(t) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} - T - \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} - S(t) = \\
&= \frac{(L + \Delta) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \left( T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} \right) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - S(t) \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t))}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) - \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \quad [4.26]
\end{aligned}$$

Далее определим величины  $L_1$  и  $L_2$ .

Из  $\Delta O'_2 N' O'_1$  и  $\Delta O'_3 E' O'_1$  следует:

$$(L + \Delta - x(O'_2))^2 + y(O'_2)^2 = L_1^2 \quad [4.27]$$

$$(L + \Delta - x(O'_3))^2 + y(O'_3)^2 = L_2^2 \quad [4.28]$$

Подставляя в уравнения [4.27] и [4.28] значения  $x(O'_2)$ ;  $y(O'_2)$  и  $x(O'_3)$ ;  $y(O'_3)$  соответственно из уравнений [4.22] [4.23] и [4.25] [4.26], преобразуя и упрощая, получим:

$$(L + \Delta) = \frac{T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + S(t) + L_1 \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) + \sin(\alpha - \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}} \quad [4.29]$$

$$(L + \Delta) = \frac{T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} + S(t) + L_2 \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} \cdot \cos(\gamma + \varphi(t)) - \sin(\gamma + \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \quad [4.30]$$

Исходя из [4.29] и [4.30], запишем

$$\begin{aligned}
& \frac{T + \frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + S(t) + L_1 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}} - \\
& \frac{T + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} + S(t) + L_2 \cdot \cos(\gamma + \varphi(t)) \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} = \\
& = \frac{\frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + L_1 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}} - \\
& \frac{\frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}} + L_2 \cdot \cos(\gamma + \varphi(t)) \left[ \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \operatorname{tg}(\gamma + \varphi(t)) \right]}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} = \\
& = \frac{\frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}}}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}} + L_1 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) + \frac{L_1 \cdot \sin(\alpha - \varphi(t))}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}} - L_2 \cdot \cos(\gamma + \varphi(t)) + \\
& \quad + \frac{L_2 \cdot \sin(\gamma + \varphi(t))}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \tag{4.31}
\end{aligned}$$

где  $L_1$  и  $L_2$  представлены в [4.13] и [4.16]

Обозначим:

$$A = \frac{\frac{r_1}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} + \frac{r_2}{\sin \frac{\varphi_2}{2}}}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}}; \quad B = \frac{L_1}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2}}; \quad C = \frac{L_2}{\operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2}} \tag{4.32}$$

С учетом введенных обозначений перепишем выражение [4.31]:

$$A + L_1 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) + B \cdot \sin(\alpha - \varphi(t)) - L_2 \cdot \cos(\gamma + \varphi(t)) + C \cdot \sin(\gamma + \varphi(t)) =$$

$$\begin{aligned}
&= A + L_1 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi(t) + L_1 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi(t) + \\
&\quad + B \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi(t) - B \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi(t) - \\
&\quad - L_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi(t) + L_2 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varphi(t) + \\
&\quad + C \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi(t) + C \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi(t) = \\
&= A + \cos \varphi(t) [L_1 \cdot \cos \alpha + B \cdot \sin \alpha - L_2 \cos \gamma + C \cdot \sin \gamma] + \\
&\quad + \sin \varphi(t) \cdot [L_1 \cdot \sin \alpha - B \cdot \cos \alpha + L_2 \cdot \sin \gamma + C \cdot \cos \gamma] = 0
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Введем обозначения:

$$\eta = L_1 \cdot \cos \alpha + B \cdot \sin \alpha - L_2 \cdot \cos \gamma + C \cdot \sin \gamma \tag{4.34}$$

$$\xi = L_1 \cdot \sin \alpha - B \cdot \cos \alpha + L_2 \cdot \sin \gamma + C \cdot \cos \gamma \tag{4.35}$$

Перепишем [4.33] с учетом [4.34] и [4.35]

$$A + \eta \cdot \cos \varphi(t) + \xi \cdot \sin \varphi(t) = 0 \tag{4.36}$$

С учетом тригонометрических соотношений

$$1 = \cos^2 \frac{\varphi}{2} + \sin^2 \frac{\varphi}{2}; \quad \cos \varphi = \cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2}; \quad \sin \varphi = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$$

преобразуем [4.36] следующим образом

$$\begin{aligned}
&A \cdot 1 + \eta \left( \cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) + \xi \cdot 2 \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} = 0 \\
&A \left( \cos^2 \frac{\varphi}{2} + \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) + \eta \left( \cos^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \cdot \xi \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \\
&(A + \eta) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} + (A - \eta) \sin^2 \frac{\varphi}{2} + 2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \xi = 0 \\
&(A + \eta) + (A - \eta) \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} + 2 \cdot \xi \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 0 \\
&(A - \eta) \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} + 2 \cdot \xi \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + (A - \eta) = 0
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Отсюда:

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - (A-\eta)^2}}{A-\eta} \quad [4.39]$$

Решая [4.39], относительно  $\varphi$ , получим:

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} \left[ \frac{-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - (A-\eta)^2}}{A-\eta} \right] \quad [4.40]$$

### **Выводы.**

1. Полученное математическое выражение отражает взаимосвязь требуемого угла поворота режущих элементов с параметрами  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $L$ ,  $T$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$ . Параметры  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – конструктивные параметры, которые, в самом общем случае могут быть переменными. Но, в подавляющем числе случаев, при проектировании их принимают константами. Параметры  $L$ ,  $T$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$  так же являются конструктивными параметрами, но их численная величина изменяется по мере износа режущих элементов за время обработки достаточно большого количества деталей. Но при обработке одного изделия влиянием величины износа режущих элементов на величину изменения этих параметров можно пренебречь, как бесконечно малыми величинами и в этом смысле считать их константами. Поэтому эти параметры можно рассматривать так же как постоянные конструктивные параметры.

2. Полученное математическое выражение может быть использовано для анализа функционирования инструмента при различных соотношениях величин конструктивных параметров и, соответственно, выбора оптимальных значений величин последних.

## **4.4. Вывод по четвертному разделу**

1. Разработан новый способ хонингования глухих отверстий (патент №103959), в котором изменен цикл обработки, а именно реализация дозированной радиальной подачи, осуществляемой не в момент реверса возвратно-поступательного перемещения, а в зоне дна обрабатываемого

отверстия, что приводит к зеркальному изменению знака интенсивности износа фронтальных частей режущих элементов.

2. Выполнена экспериментальная апробация разработанного способа (патент №103959), по результатам которой установлено, что при поступательном перемещении интенсивность съёма припуска на порядок выше, чем при возвратном перемещении, что служит подтверждением логичности реализации дозированной подачи в зоне дна обрабатываемого отверстия.

3. Предложен и обоснован новый способ хонингования глухих отверстий при котором бруски выполнены по длине с постоянной шириной, а переменная износостойкость по длине обеспечивается переменными физико-механическими свойствами, что обеспечивает равномерность темпа износа по длине режущих элементов, что в свою очередь, повышает точность обработки.

4. Разработан новый способ хонингования глухих отверстий (патент №107816). при котором периодически изменяют ориентацию режущих элементов в продольном сечении, что исключает накопительный характер неравномерности размерного износа режущих элементов по их длине, что в соответствии исключает накопительный характер генерирования конусообразной погрешности формы обрабатываемого отверстия.

5. Разработан новый способ хонингования глухих отверстий (патент №104785) суть которого заключается в том, что во время хонингования осуществляют дополнительный, независимый компенсационный поворот режущих элементов величина которого выбирается таким образом, что имеет место цилиндрическая форма рабочей части инструмента во время всего цикла обработки, в свою очередь обеспечивает точность обработки.



## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача обеспечения эффективности обработки высокоточных глухих отверстий на основе анализа механизма генерирования погрешностей формы в продольном сечении и создание новых и усовершенствование существующих способов хонингования отверстий, и технологической оснастки.

1. Предложен и обоснован новый способ хонингования глухих отверстий, в котором изменен цикл обработки, а именно дозированная радиальная подача, осуществляемая в момент реверса возвратно-поступательного перемещения в зоне дна обрабатываемого отверстия, что существенно повышает точность обработки за счет зеркального изменения знака интенсивности износа фронтальных частей режущих элементов (патент №103959).

2. Предложен и обоснован новый способ хонингования глухих отверстий при котором бруски выполнены по длине с постоянной шириной, а переменная износостойкость по длине обеспечивается переменными физико-механическими свойствами, что обеспечивает равномерность темпа износа по длине режущих элементов, что в свою очередь, повышает точность обработки.

3. Предложен и обоснован новый способ хонингования глухих отверстий при котором имеют место периодические изменение ориентации режущих элементов в продольном сечении, что исключает накопительный характер неравномерности размерного износа режущих элементов по их длине, что в соответственно исключает накопительный характер генерирования конусообразной погрешности формы обрабатываемого отверстия (патент №107816).

4. Предложен и обоснован новый способ хонингования глухих отверстий суть которого заключается в том, что во время хонингования осуществляют дополнительный, независимый компенсационный поворот режущих элементов величина которого выбирается таким образом, что имеет место цилиндрическая

форма рабочей части инструмента во время всего цикла обработки, в свою очередь обеспечивает точность обработки (патент №104785).

5. Получено уравнение устанавливающее зависимость характера износа по длине режущих элементов в зависимости от наладочных и кинематических параметров обработки, а также конструктивных параметров инструмента и обрабатываемого отверстия.

6. Получена математическая зависимость для выбора и оптимизации конструктивных параметров инструмента, который содержит поворотные режущие элементы с возможностью их поворота в соответствии с неравномерностью размерного износа по длине с целью обеспечения линейной зависимости величины осевого перемещения разжимного элемента и величины компенсационного угла поворота режущих элементов.

7. Установлено, что в пределах границы варьирования шириной режущих элементов, величина, равная отношению суммарной ширины режущих элементов к длине окружности обрабатываемого отверстия, для известных операций хонингования является случайным и подчиняется закону нормального распределения, что позволяет теоретически обоснованно выбирать число и ширину режущих элементов и, в частности, с помощью которого возможно теоретическое обоснование границ варьирования шириной трапецеидальных брусков.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. с. 1437205 СССР, МКИЗ В24 D 17/00. Способ изготовления абразивного инструмента/ Л.И. Мастюгин, А.П. Якимахо, В.В. Минец, С.В. Амазов, И.П. Филонов (СССР). – №4160477/40–08; заявл. 21.10.86; опубл. 15.11.88, Бюл. №42.
2. А.с. 288972. Разжимной инструмент для доводки отверстий, /Кудашев В,Я.,Петров А,А, - 1968.
3. А.с. № 1514587. БИ, № 38, 1989. Механизм радиальной подачи хонинговального станка. /Кудояров Р.Г., Тихонов О.Р. - 1989.
4. Акмаев О.К. Влияние элементов конструкции оснастки на исправляющую способность операции хонингования. //Актуальные проблемы финишной обработки деталей машин абразивными и алмазными брусками. – Уфа: УАИ, 1981. – С. 95-97.
5. Алмазно-абразивная обработка: Науч. тр. // Пермский политехнический институт. – 1974. – №149. – С. 138.
6. Алмазно-абразивная обработка. Межвуз. сб. науч. трудов. // Пермский государственный университет. – 1976. – №184. – С. 162.
7. Алмазное хонингование. РТМ 2 Н83 - 50 - 82. - М.: ВНИИАЛМАЗ, 1982. -29 с.
8. Андреев М. Повышение производительности хонингования глухих отверстий путем оптимизации режимов обработки и конструктивных параметров инструмента: автореф.дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: 05.02.08 «Технология машиностроения» / А. М. Витальевич. – Бийск, 2005 – 21с.
9. Андреев М.В., Фирсов А.М. Повышение точности геометрической формы глухих отверстий при хонинговании // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении. Материалы 3-й Всероссийской научно- практической конференции 25-26 сентября. - Бийск, 2003. - с. 143-147.

10. Андреев М.В., Фирсов А.М. Повышение точности геометрической формы отверстий в поперечном сечении при хонинговании // Современные технологические системы в машиностроении. Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции 18-19 ноября. - Барнаул, 2003.-с. 9-10.
11. Бабаев С. Г. Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий / С. Г. Бабаев, Н. К. Мамедханов, Р. Ф. Гасанов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 103 с.
12. Бабичев А. П. Хонингование / А. П. Бабичев. – Москва: Машиностроение, 1965. – 96 с.
13. Башта. Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др.- 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
14. Богородицкий Н. Н. Технологическое оснащение хонингования / Н. Н. Богородицкий, К. К. Чубаров, Б. А. Лебедев. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 237 с.
15. Буюкли И.М. Кинематические зависимости процесса хонингования отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // Промислова гідрравліка і пневматика, всеукраїнський науково-технічний журнал, Вінниця: Глобус-прес, 2013. – Вип.4(42). – С. 79 – 82.
- 16 Буюкли И.М. Способ комбинированной обработки точных отверстий больших диаметров и длин в деталях из труднообрабатываемых материалов / И.М. Буюкли, В.Д. Иоргачев, В.М. Колесник // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Вип. 1(2). – О.: АО Бахлава, 2013. – С. 81 – 88.
17. Буюкли И.М. Кинематические зависимости процесса хонингования отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // XIV Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідрравліка і пневматика». – Одеса 18-19 вересня 2013 р., матеріали конференції. – Вінниця «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013 – 144с. – С. 79 – 82.

18. Буюкли И.М. Повышение точности хонингования отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // Праці Одеського політехнічного університету, Одеса, 2015. – Вип.1(45). – С. 34 – 43.
19. Буюкли И.М. Разработка нового способа и инструмента для хонингования глухих отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету – Луцьк, 2014. – Вип. 44 – С. 28 – 32.
20. Буюкли И.М. Точность при хонинговании глухих отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // Праці Одеського політехнічного університету, Одеса, 2013. – Вип.2(41). – С. 83 – 88.
21. Буюкли И.М. Точность формы в продольном сечении при хонинговании глухих отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // Праці Одеського політехнічного університету, Одеса, 2013. – Вип.3(42). – С. 49 – 54.
22. Вопросы расчета и конструирования оснастки, обеспечивающей повышение точности при хонинговании: Науч. тр. // Уфимский авиационный институт. – 1973. – №44. – С. 159.
23. Гавриленко Б. А. Гидравлический привод / Б. А. Гавриленко, В. А. Минин, С. Н. Рождественский. – Москва: Машиностроение, 1969. – 502 с.
24. Гельфанд И. М. Обобщенные функции и действия над ними / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилов. – Москва: Гостехиздат, 1958. – 439 с.
25. Головань А. Я. Алмазное точение и выглаживание / А. Я. Головань, Э. Г. Грановский, В. Н. Машков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 30 с.
26. Дальский А. М. Технология изготовления деталей машин Т. III / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров. – Москва: Машиностроение, 2000. – 840 с.
27. Диваев Р.И., Кудояров Р.Г., Акмаев О.К. К вопросу повышения точности алмазно-абразивной обработки отверстий деталей машин. //Повышение эффективности технологических процессов машиностроения: Межвуз. сб. научн. трудов. - Пермь, 1980. - С. 132-134

28. Допуски и посадки: Справочник. . В 2-х ч. / В.Д. Мягков, М. А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 543 с.

29. Допуски и посадки: Справочник. . В 2-х ч. 2/ В.Д. Мягков, М. А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 448 с.

30. Древаль А. Е. Краткий справочник металлиста / Под общ. ред. / А. Е. Древаль, Е. А. Скороходов. – Москва: Машиностроение, 2005. – 961 с.

31. Евстигнеев М. И. Технология производства двигателей летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов / М. И. Евстигнеев, А. В. Подзей, А. М. Сулима. – Москва: Машиностроение, 1982. – 260 с.

32. Егоров М. Е. Технология машиностроения Учебник для вузов. Изд. 2-е, доп. / М. Е. Егоров. – Москва: Высшая школа, 1976.

33. Зельманович Я. Б. Высшая математика для физиков и техников / Я. Б. Зельманович, И. М. Яглом. – Москва: Наука, 1982. – 512 с.

34. Исаков А.Э. Хонингование с дозированной подачей и оборудование для его реализации. // Хонингование цилиндрических и фасонных поверхностей. - Пермь, 1988. - С. 64-67.

35. Казнук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Казнук, А. Б. Верещагин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 480 с.

36. Клепиков В. В. Технология машиностроения: Учебник / В. В. Клепиков, А. Н. Бодров. – Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 860 с.

37. Кремень З. И. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом: Учебник для машиностроит. техникумов / З. И. Кремень, Г. И. Буторин, В. М. Коломазин. – Ленинград: Машиностроение, 1989. – 207 с.

38. Кремень З. И. Хонингование и суперфиниширование деталей / З. И. Кремень, И. Х. Стратиевский. – Ленинград: Машиностроение, 1988. – 137 с.

39. Кудин А. К. Алмазное хонингование отверстий в корпусных деталях / А. К. Кудин, С. Д. Шевченко, И. Ф. Томилин., 1968. №6. – 44 с.

40. Кудояров Р.Г. Точность деталей машин при алмазном хонинговании. - М.: МАИ, 2002. – 170с.
41. Куликов С.С. Прогрессивные методы хонингования / С. С Куликов, Ф. Ф. Ризванов. – Москва: Машиностроение, 1983. – 135 с.
42. Левин Б. Г. Алмазное хонингование отверстий / Б. Г. Левин, Я. Л. Пятов. – Ленинград: Машиностроение, 1969. – 112 с. 60.
43. Маталин А. А. Тонкое и алмазное раетачивание / А. А. Маталин, П. А. Линчевский, К. В. Ломакин. – Київ: Техніка, 1973. – 80 с.
44. Мельничук П. П. ехнологія машинобудування: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / П. П. Мельничук, А. І. Боровик, П. А. Лінчевський. – Житомир, 2005. – 898 с.
45. Минков М.А. Хонингование. /Справочная книга по отделочным операциям в машиностроении. – Д.: Лениздат, 1966. - С. 114 – 148
46. Муратов Р.А. Траектория движения инструмента при хонинговании / Повышение качества деталей при окончательных методах обработки: Межвузовский сб. научн. трудов. - Пермь: ПЛИ, 1977. - С. 83 - 87.
47. Наерман М. С. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками / М. С. Наерман, С. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1971. – 222 с.
48. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М. С. Наерман, М. Наерман, А. Э. Исаков. – Москва: Высшая школа, 1991. – 207 с.
49. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М. С. Наерман. – Москва: Высшая школа, 1985. – 207 с.
50. Огородов В.А. Управление процессом алмазного хонингования / Огородов В.А. // Вестник УГАТУ, Уфа 2008. – Т.10, №1(26). – С. 122 – 127.
51. Орлов П. Н. Краткий справочник металлиста /Под общ. ред. / П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 960 с.
52. Павлючук А. И. Хонингование глубоких отверстий малых диаметров высокой точности при помощи металлокерамических брусков с алмазным

наполнением / А. И. Павлючук. // Автомобильная промышленность. – 1959. – №4.

53. Павлючук М. И. Алмазный инструмент для хонингования отверстий малого диаметра/М. И. Павлючук, Б. Н. Кирилин. – Москва: ГОСИНТИ, 1964 – 114 с.

54. Пантелеев А. А. Автоматизация доводки центрального отверстия н гильзах плунжера / А. А. Пантелеев., 1962.

55. Пат. 2233216 Российская Федерация, МПК7 7 В24В 33/06. Способ хонингования/ А.М. Фирсов, Андреев М.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технологический университет И.И. Ползунова. – № 2003110903/02; заявл. 16.04.2003; опубл. 27.07.2004, Бюл. №21

56. Патент 103959 Україна, МПК (2014.01) В24В 33/00. Спосіб хонінгування глухих отворів / І.М Буюклі, В.М. Колеснік, П.А. Лінчевський; – № а2012 07674; заявл. 10.12.2013; опубл. відомостей про заявку 25.01.2013, Бюл. №2; публ. відомостей про видачу патенту 10.12.2013, Бюл. №2.

57. Патент 104785 Україна, МПК (2013.01) В24В 33/00. Спосіб хонінгування глухих отворів і інструмент для його здійснення/ І.М Буюклі, В.М. Колеснік, П.А. Лінчевський; – № а2012 07667; заявл. 11.03.2014; опубл. відомостей про заявку 25.01.2013, Бюл. №2; публ. відомостей про видачу патенту 11.03.2014, Бюл. №5.

58. Патент 107816 Україна, МПК (2015.01) В24В 33/00. Спосіб хонінгування глухих отворів і інструмент для його реалізації/ І.М Буюклі, В.М. Колеснік, П.А. Лінчевський; – № а2012 07669; заявл. 25.02.2015; опубл. відомостей про заявку 25.01.2013, Бюл. №2; публ. відомостей про видачу патенту 25.02.2015, Бюл. №4.

59. Полянский В.И. Определение путей повышения точности и производительности механической обработки на финишных операциях / В.И. Полянский // Физические и компьютерные технологии: труды 17-й Междунар. науч.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2011. ? С. 55-63.



60. Полянский В.И. Теоретическое обоснование технологических возможностей процессов точения и шлифования / В.И. Полянский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. Вип. 106. – С. 93-98.

61. Полянський В.І. Технологічне забезпечення якості та продуктивності механічної обробки отворів в деталях гідроапаратури: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування”.

62. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва: Машиностроение, 1977.

63. Пятов Я. Л. Высокопроизводительная оснастка для алмазного хонингования / Я. Л. Пятов. – Москва: ГОСИНТИ, 1964.

64. Рациональная эксплуатация алмазного инструмента / М. Е.Каминский, М. С. Наерман, Л. К. Петросян, С. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1965. – 239 с.

65. Резников А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. / А. Н. Резников. – Москва: Машиностроение, 1977.

66. Руденко П. А. Отделочные операции в машиностроении. Справочник / П. А. Руденко, М. Н. Шуба, В. А. Огнivec. – Київ: Техніка, 1990. – 150 с.

67. Рябенко І.О. Підвищення ефективності обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф.дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / І.О. Рябенко. – Одеса, 2009. – 21с.

68. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Київ: Техніка, 1974. – 180 с.

69. Сафронов В. Г. Исследование процесса алмазного хонингования отверстий в стальных закаленных деталях : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Сафронов В. Г. – Москва, 1965.

70. Сверлильные и хонинговальные станки / С. И. Куликов, В. П. Волоценко, Ф. Ф. Ризванов, А. Л. Воронов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 232 с.
71. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – Москва: Наука, 1970. – 166 с.
72. Соколов С. П. Обработка деталей абразивными брусками / С. П. Соколов, З. И. Кремень. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 123 с.
73. Солонин И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Солонин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 217 с.
74. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. - 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920с.
75. Справочник технолога - машиностроителя. В 2-х т.1/Мод ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1, 2001г. 912 с., ил.
76. Степашкина С. М. Прогрессивные технологические процессы в автостроении/Под ред./С. М. Степашкина. – Москва: Машиностроение, 1980. – 318 с.
77. Стохастичні процеси у гіддроприводах верстатів: [монографія] / В.Б. Струтинский, В.М. Тіхенко. - Одеса: Астропринт, 2009. - 456 с. ISBN 978-966-190-3.
78. Технологический метод повышения точности геометрической формы обрабатываемых отверстий: [Электронный ресурс] / Муратов К.Р, Гашев Е.А. // SWorld – 1-12 October 2014 — Режим доступа до журн.: <http://www.sworld.com.ua/konfer36/291.pdf>.
79. Технология машиностроения. Часть II. Проектирование технологических процессов: Учеб, пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский та ін., Под ред. С.Л. Мурашкина. СПб. Изд-во СПбГТУ 2000. – 498 с.
80. Фрагин И. Е. Новое в хонинговании / И. Е. Фрагин. – Москва: Машиностроение, 1980. – 96 с.

81. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Ленинград: Наука, 1975. – 226 с.
82. Холмогорцев Ю. Оптимизация процессов обработки отверстий / Холмогорцев Ю. П. – Машиностроение, 1984 – 184 с.
83. Хонингование: справочное пособие / С. И. Куликов, В. А. Романчук, Ф. Ф. Ризванов, Ю. М. Евсеев. – Москва: Машиностроение, 1973. – 168 с.
84. Чеповецкий И. Х. Основы финишной алмазной обработки / И. Х. Чеповецкий. – Київ: Наукова думка, 1980. – 467 с.
85. Шпур Г. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х кн., кн. 2 / Под ред. Г. Шпур, Т. Штеферле; Пер. с нем. под ред. Ю. М. Соломенцева – Москва: Машиностроение, 1985. – 688 с.
86. Haasis G. Honen in der rationellen Fertigung. Techn. Rdsch. 1959, 37, - S. 87 - 95, 38, - S. 77 – 87.
87. Haasis G. Plateau-Honen als Modifikation einer Feinbearbeitung. Jahrb. Schleif-, Hon-, Lahn- und Poliertechn. 46. Ausgabe. Vulkan Verlag, Essen 1974.
88. Klink U., Flores G. Das Honen von Sacklochbohrungen. T. Z. f. prakt. Metallbearb. 71. Jahrgang, 1977, Heft 1, S. 21-24.

## Приложение А «Патент и формула изобретения № 103959»



(11) **103959**(19) **UA**(51) **МПК (2013.01)  
B24B 33/00**

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2012 07674</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>22.06.2012</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>10.12.2013</b></p> <p>(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: <b>25.01.2013, Бюл. № 2</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>10.12.2013, Бюл. № 23</b></p>	<p>(72) Винахідники: <b>Буюклі Іван Михайлович, UA, Колеснік Василь Михайлович, UA, Лінчевський Павло Адамович, UA</b></p> <p>(73) Власники: <b>Буюклі Іван Михайлович, вул. Ак. Корольова, 60, кв. 43, м. Одеса, 65104, UA, Колеснік Василь Михайлович, пр. Шампанський, 7, к. 903, м. Одеса, 65058, UA, Лінчевський Павло Адамович, пр. Маршала Жукова, 4, кв. 91, м. Одеса, 65121, UA</b></p>
--	--

(54) Назва винаходу:

**СПОСІБ ХОНІНГУВАННЯ ГЛУХИХ ОТВОРІВ**

(57) Формула винаходу:

Спосіб хонінгування глухих отворів, що включає зворотно-поступальне переміщення з асиметричним перебігом, обертальне переміщення і дозовану (дискретну) радіальну подачу різальних елементів інструмента відносно отвору, що хонінгується, який відрізняється тим, що дозовану радіальну подачу здійснюють одночасно з реверсуванням зворотно-поступального переміщення в крайньому положенні інструмента в зоні дна отвору, що оброблюється.

## Приложение Б «Патент и формула изобретения № 104785»



(11) 104785

(19) UA

(51) МПК (2014.01)  
B24B 33/00

- (21) Номер заявки: **а 2012 07667**
- (22) Дата подання заявки: **22.06.2012**
- (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **11.03.2014**
- (41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: **25.01.2013, Бюл.№ 2**
- (46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **11.03.2014, Бюл. № 5**

- (72) Винахідники:  
**Буюклі Іван Михайлович, UA,  
Колеснік Василь Михайлович, UA,  
Лінчевський Павло Адамович, UA**
- (73) Власники:  
**Буюклі Іван Михайлович,  
вул. Ак. Корольова, 60, кв. 43,  
м. Одеса, 65104, UA,  
Колеснік Василь Михайлович,  
пр. Шампанський, 7, к. 903, м.  
Одеса, 65058, UA,  
Лінчевський Павло Адамович,  
пр. Маршала Жукова, 4, кв. 91,  
м. Одеса, 65121, UA**

(54) Назва винаходу:

**СПОСІБ ХОНІНГУВАННЯ ГЛУХИХ ОТВОРІВ І ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ**

(57) Формула винаходу:

1 Спосіб хонінгування глухих отворів, що включає зворотно-поступальний рух, обертальний рух і радіальну подачу різальних елементів відносно осі отвору, що хонінгується, який відрізняється тим, що кожен різальний елемент за час зйому припуску повертають в площині, що проходить через вісь отвору, що хонінгують, і вектор радіальної подачі на кутову величину, що дорівнює арктангенсу відношення різниці величин середнього радіального зносу по краях різальних елементів в подовжньому напрямі до довжини різальних елементів.

2. Інструмент для здійснення способу за п. 1, що складається з корпусу, в подовжніх радіальних пазах якого, рухливо і з можливістю контактування з голкою розтиску, встановлені різальні елементи, який відрізняється тим, що кожен різальний елемент виконаний з двома рознесеними по довжині опорними поверхнями і встановлений з можливістю радіального переміщення і повороту, а голка розтиску виконана з двома різними за величинами конусності рознесеними по довжині робочими опорними частинами, кожна з яких контактує з відповідною опорною поверхнею різальних елементів.

## Приложение В «Патент и формула изобретения № 107816»





(11) 107816

(19) UA

(51) МПК (2015.01)  
B24B 33/00

- (21) Номер заявки: **а 2012 07669**
- (22) Дата подання заявки: **22.06.2012**
- (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **25.02.2015**
- (41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: **25.01.2013, Бюл. № 2**
- (46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **25.02.2015, Бюл. № 4**

- (72) Винахідники:  
**Буюклі Іван Михайлович, UA,  
Колеснік Василь Михайлович, UA,  
Лінчевський Павло Адамович, UA**
- (73) Власники:  
**Буюклі Іван Михайлович,  
вул. Ак. Корольова, 60, кв. 43,  
м. Одеса, 65104, UA,  
Колеснік Василь Михайлович,  
пр. Шампанський, 7, к. 903, м.  
Одеса, 65058, UA,  
Лінчевський Павло Адамович,  
пр. Маршала Жукова, 4, кв. 91,  
м. Одеса, 65121, UA**

(54) Назва винаходу:


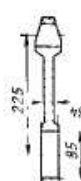
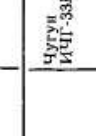
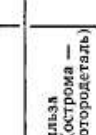
**СПОСІБ ХОНІНГУВАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ**

(57) Формула винаходу:

- Спосіб хонінгування глухих отворів, у якому здійснюють хонінгування з одностороннім перебігом алмазонасучих елементів відносно поверхні, яку хонінгують, який відрізняється тим, що алмазонасучі елементи періодично встановлюють в їх власних пазах у корпусі інструмента заново, міняючи їх подовжню орієнтацію на протилежну.
- Інструмент для хонінгування глухих отворів, що містить корпус, в подовжніх пазах якого рухомо в радіальному напрямку встановлені змінні алмазонасучі елементи з можливістю контакту з голкою розтиску за допомогою відповідних поверхонь взаємодії, що містять опорні робочі поверхні кожного з алмазонасучих елементів та опорні робочі поверхні клиноподібної частини голки розтиску, що нахилені до осі обертання інструмента, який відрізняється тим, що згадані поверхні взаємодії виконані таким чином, що дозволяють переустановлювати кожен з алмазонасучих елементів в його власному пазу зі зміною повздовжньої орієнтації алмазонасучого елемента, де:  
опорні робочі поверхні кожного з алмазонасучих елементів виконані паралельними осі обертання інструмента, а згадані поверхні взаємодії додатково містять передбачені на введеному між голкою розтиску та алмазонасучими елементами проміжному клиноподібному елементі перші опорні поверхні проміжного клиноподібного елемента, які паралельні осі обертання інструмента, та другі опорні поверхні проміжного клиноподібного елемента, які нахилені неї, причому опорні робочі поверхні клиноподібної частини голки розтиску безпосередньо контактують з другими опорними поверхнями проміжного клиноподібного елемента, а перші опорні поверхні проміжного клиноподібного елемента - з опорними робочими поверхнями кожного з алмазонасучих елементів;  
або  
опорна поверхня кожного з алмазонасучих елементів містить дві опорні робочі поверхні, що простягаються вздовж алмазонасучого елемента та нахилені однаково назустріч одна одній з можливістю безпосереднього періодичного контакту з опорними робочими поверхнями клиноподібної частини голки розтиску: одна при одній орієнтації алмазонасучого елемента, а друга - при протилежній.

# Приложение Г «Известные экспериментальные данные по хонингованию»

Прогрессивное хонингование некоторых типовых деталей автогравировочной промышленности

Деталь	Эскиз детали	Материал	Вид хонингования	Хонинговальный станок, автомат	Режимы хонингования		СОЖ	Характеристика и размеры брусков						Высота алмазного слоя, мкм	Число брусков в комплекте, шт.	Припуск на диаметр, мкм	Машинное время, с	Отклонение от цилиндричности, мкм		Шероховатость поверхности, мкм		
					$v_c$ , м/с	$v_f$ , мм/мин		Зернистость	Концентрация, %	Связь	Ширина бруска, мкм	Длина бруска, мкм	Абразивный материал					До хонингования	После хонингования	До хонингования	После хонингования	
Шпатель (КамАЗ)		Сталь 40ХН2МА	Предварительное	Автомат СС356	3,83	0,1	1,0	АС 125/100	100	М1	4	35	1,5	8	0,06	45	0,03	0,016	20	2,5	0,63	
			Окончательное		3,83	0,1	0,5	АС 63/40	100	М1	4	35	1,5	8	0,01	25	0,016	0,01	2,5	0,63		
			Сталь 40ХН2МА	Предварительное	Автомат СС355	7,83	0,105	1,0	АС 80/63	100	М1	3	45	1,5	6	0,05	45	0,03	0,015	20	2,5	0,63
				Окончательное		7,83	0,105	0,5	АС 63/40	100	М1	3	45	1,5	6	0,01	25	0,015	0,01	2,5	1,25	
Гильза (ЗИЛ)		Чугун СЧ 20	Предварительное	Станок 3М83	4,8	0,27	1,2	АС 90/63	50	М1	12	80	1,5	9	0,06	60	0,02-0,03	0,02	20	1,25	0,63	
			Окончательное		4,8	0,2	0,6	АС 63/40	50	М1	12	80	1,5	6	0,01	25	0,02	0,02	1,25	0,63		
			Чугун ИЧ-33М	Предварительное	Автомат СС310А	2,67	0,22	1,2	АС 80/63	100	М1	6	125	1,5	10	0,03	25	0,04	0,02	2,5	0,63	
				Окончательное		1,73	0,22	0,6	АС 28/20	100	М1	6	125	2,0	10	0,01	40	0,02	0,02	0,63	0,32	

Продолжение табл. 20

Деталь	Экземпляр детали	Материал	Вид хонингования	Хонинговальный станок автомат	Режимы хонингования		СОЖ	Характеристика и размеры брусков						Машинное время, с	Отклонение от стандартных мест, мкм		Шероховатость поверхности, мкм			
					$v_{ср}$ , м/с	$p$ , МПа		Абразивная материя	Зернистость	Концентрация на твердость, %	Связка	Ширина бруска, мм	Длина бруска, мм		Высота алмазного слоя, мкм	Число брусков в комплекте, шт.	Припуск на диаметр, мкм	Машинное время, с	до хонингования	после хонингования
Блок цилиндров (ЗИЛ)		Чугун СЧ 20	Однократное	Станок 3А84	4,5/0,21	1,8	СОЖ	АС	40/28, 50	М1	12	240	1,0	5	0,005—0,06	60—90	0,02	0,01	20	0,63
Блок цилиндров (ММЗ)		Чугун СЧ 20	Однократное	Станок 3А84	2,1/0,1	0,8	Керосин	АС	28/20, 10/1	М1	10	280	1,5	6	0,03—0,04	25—30	0,02	0,01	2,5	0,63
Шестерня первой передачи (ЗИЛ)		Сталь 25ХГМ (незакален.)	Однократное	Станок 3М83	4,1/0,13	1,0	Бемент	ББ	25—40	Т	В	38	25	4	0,04—0,05	20	0,02	0,015	20	1,25
Каретка синхронизатора (ЗИЛ)		Сталь 25ХГМ HRC 57—60	Однократное	Станок 382	4,0/0,08	1,2	Керосин	А	125/100	30	М1	24	30	4	0,15	40	0,1	0,01	2,5	1,25
Блок шестерен заднего хода (ЗИЛ)		Сталь 25ХГМ HRC 57—60	Однократное	Станок СС139	5/0,1	0,9	Керосин	А	63/50	50	М1	12	40	8	0,03	30	0,02	0,01	1,25	0,63

Таблица 27  
Характерные данные из опыта алмазного хонингования типовых деталей

№ п/п	Наименование детали	Материал	Размеры отверстия D и l в мм	Вид хонингования	Технические требования в мкм						Фирма и модель станка	
					Овальность		Кругособразность		Класс чистоты			
					до	после	до	после	до	после		
<b>Детали толкателя</b>												
1	Седло клапана		$8^{+0,01} \times 17$			0,04	0,01	0,04	0,01	▽6	▽8	ОФ-26А с модернизацией
2	Гильза плунжера	ШХ15 HRC 60	$10^{+0,01} \times 47$	Предварительное		0,01	0,001	0,01	0,001	▽6	▽9	ОФ-20 с модернизацией
3	Втулка		$12^{+0,01} \times 26$			0,03	0,01	0,03	0,01	▽6	▽8	ОФ-26А с модернизацией
4	Гильза плунжера	ХВГ HRC 60	$13^{+0,01} \times 78$			0,01	0,001	0,02	0,004	▽7	▽8	«Микромастик»
5	Гильза плунжера		$13^{+0,01} \times 78$			0,001	0,0005	0,004	0,002	▽8	▽10	ОФ-26А с модернизацией
6	Резинок толкателя	ШХ15 HRC 60	$15^{+0,01} \times 16$	Окончательное		0,03	0,01	0,03	0,01	▽6	▽8	ОФ-26А с модернизацией
<b>Зубчатые колеса</b>												
7	Блок шестерен	38ХА HRC 54	$28,58^{+0,025} \times 167,5$	Предварительное		0,05	0,012	0,05	0,012	▽5	▽7	ОФ-14А
8	Зубчатое колесо	18ХГТ HRC 60	$28,58^{+0,025} \times 167,5$	Окончательное		0,01	0,012	0,01	0,012	▽7	▽9	382
9	Шестерня	25ХГМ HRC 58	$52^{+0,040} \times 60$	Предварительное		0,1	0,02	0,1	0,02	▽5	▽7	ОФ-42
10	Шестерня	35ХС HRC 40	$61^{+0,05} \times 33$	Окончательное		0,1	0,01	0,1	0,015	▽5	▽7	ОФ-38
11	Шестерня		$58^{+0,02} \times 44$			0,05	0,03	0,04	0,005	▽7	▽8	
<b>Блоки и цилиндры</b>												
12	Цилиндр двигателя	СЧ 21-40 НВ 200	$72^{+0,03} \times 105$	Предварительное		0,06	0,02	0,02	0,01	▽5	▽7в	ОФ-14
13	Блок цилиндров	СЧ 24-44 НВ 205	$72^{+0,03} \times 105$	Окончательное		0,01	0,005	0,014	0,01	▽7в	▽9в	
14	Блок цилиндров		$82^{+0,02} \times 205$	Предварительное		0,05	0,03	0,03	0,01	▽6	▽7	«Барнес-Драйл»
15	Цилиндр (резьбистый)	Чугун легированный НВ 240	$82^{+0,02} \times 205$	Окончательное		0,007	0,01	0,01	0,01	▽7	▽9	«Наумбург»
16	Цилиндр (резьбистый)		$105^{+0,05} \times 220$	Предварительное		0,13	0,1	0,02	0,1	▽5	▽6	3А83
17	Цилиндр (резьбистый)		$105^{+0,03} \times 220$	Окончательное		0,05	0,02	0,02	0,02	▽6	▽7в	3А84
18	Гильза цилиндра	38ХМЮА HRC 62	$120^{+0,025} \times 500$	Предварительное		0,2	0,1	0,03	0,04	▽5	▽7	
19	Гильза цилиндра		$120^{+0,025} \times 500$	Промежуточное		0,06	0,03	0,04	0,02	▽7	▽8	
20	Гильза цилиндра		$120^{+0,025} \times 500$	Окончательное		0,01	0,02	0,02	0,02	▽8	▽10	

Продолжение табл. 27

№ пп.	Наименование детали	Материал	Размеры отверстий D и L в мм	Над. конигования	Притупление на D и мм		Технические требования в мм				Фирма и модель станка	
					Овальность		Конусообразность		Класс чистоты			
					до	после	до	после	до	после		
<b>Шатуны двигателя</b>												
21	Шатун	18X2H4BA HRC 34	42 <sup>+0,016</sup> × 34	Предварительное	0,12	0,015	0,03	0,01	▽7	0Ф-38А с модернизацией		
22		18X2H4BA HRC 38	42 <sup>+0,016</sup> × 34	Окончательное	0,06	0,015	0,01	0,01	▽8	3833М с модернизацией		
23			103 <sup>+0,005</sup> × 75	0,05	0,035	0,005	0,035	0,005	▽76			
24		18X2H4BA HRC 34	111 <sup>+0,021</sup> × 95	Предварительное	0,07	0,020	0,030	0,010	▽76	ЗА84		
25	111 <sup>+0,021</sup> × 95		0,01	0,015	0,010	0,010	0,010	▽76				
26	Шатун СМД-14	40X HB 250	72 <sup>+0,021</sup> × 70	Окончательное	0,05	0,03	0,03	0,010	▽6	«Наушбург»		
27		45X HB 250	84 <sup>+0,021</sup> × 90	0,03	0,02	0,012	0,02	0,012	▽6			
28	Втулка шатуна	ШХ15 HRC 60	51 <sup>+0,02</sup> × 45	Предварительное	0,08	0,03	0,03	0,005	▽7	0Ф-38А с модернизацией		
29			51 <sup>+0,02</sup> × 45	Окончательное	0,02	0,005	0,005	0,005	▽8			
<b>Детали гидросистем</b>												
30	Клапанная коробка		31 <sup>+0,015</sup> × 50		0,04	0,01	0,005	0,01	0,005	▽6	▽9	
31	Корпус распределителя	СЧ 21—40 HB 200	32 <sup>+0,015</sup> × 125		0,05	0,03	0,004	0,03	0,004	▽6	▽9	0Ф38А с модернизацией
32	Корпус золотника		42 <sup>+0,015</sup> × 125		0,05	0,03	0,004	0,03	0,004	▽6	▽9	
33	Направляющая клапана	9X HRC 60	21 <sup>+0,02</sup> × 33		0,05	0,02	0,005	0,03	0,005	▽5	▽8	
34	Цилиндр гидроусилителя	СЧ 18—36 HB 200	22 <sup>+0,02</sup> × 110		0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	▽6	▽9	0Ф-20

№ пп.	Наименование детали	Режим конигования				Характеристики брусков				Показатели работы брусков					
		φ		R <sub>в</sub> в кг/см <sup>2</sup>	R <sub>н</sub> в кг/см <sup>2</sup>	σ <sub>в</sub> в мм	T <sub>н</sub> в мин	R <sub>в</sub> в кг/см <sup>2</sup>	R <sub>н</sub> в мм	Связка	Концентрация в %	Количество в комплекте	Стоимость (количество обработанных деталей)	Удельный расход масла в мл/г	Удельная производительность в (г/мин)/см <sup>2</sup>
		φ	φ												
<b>Детали топливной аппаратуры</b>															
1	Седло клапана	18	10	2	—	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	Гильза плунжера	28,3	6,9	—	0,2	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	Втулка	27,5	14	2	—	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Гильза плунжера	47	9,7	—	0,3	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 27

№ п/п	Наименование детали	Режимы эксплуатации				Размеры в мм D × H × S × L	Т <sub>н</sub> в мин	Показатели работоспособности			Показатели работоспособности							
		t <sub>0</sub>	t <sub>н</sub>	P <sub>н</sub> в кВт	n в об/мин			Концентрация в %	Число в кондукте	Стоимость (по количеству обработок)	Удельная масса в кг/м <sup>3</sup>	Удельная прочность в (кг/мм <sup>2</sup> )						
5	Гильза плунжера	47	9,7	—	—	3 × 3 × 1 × 75	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	Ролик толкателя	34	14	—	—	4 × 3 × 1 × 50	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	Блок шестерен	71,5	24,4	12	—	<b>Зубчатые</b>		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	Зубчатое колесо	71,5	24,4	8	—	8 × 3 × 1 × 100	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9		30	18	10	—	8 × 3 × 1 × 100	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	Шестерня	60	7,2	12	—	8 × 6 × 1,5 × 45	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11		36	6	2	—	12 × 5 × 1 × 40	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
						8 × 4 × 2 × 25	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
						<b>Блоки и гильзы</b>		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	Цилиндр двигателя	68	7,2	10	—	11 × 3 × 2 × 62	0,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
13	Блок цилиндров	45	6,3	4	—	11 × 3,5 × 1,5 × 62	0,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
14		42	15	20	—	8 × 3,5 × 1,5 × 100	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
15	Цилиндр ребор- стый	45	15	8	—	8 × 3,5 × 1,5 × 100	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
16		45	15	8	—	12 × 4 × 1 × 128	1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
17	Гильза цилиндра	45	15	3	—	12 × 4 × 1 × 128	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
18		28,3	12	—	—	12 × 8 × 3 × 150	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
19		28,3	12	—	—	12 × 6 × 2 × 150	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20		28,3	12	—	—	12 × 6 × 2 × 150	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21	Шатуны	26,3	7,2	—	—	10 × 4 × 1,5 × 28	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
22		26,3	7,2	—	—	10 × 4 × 1,5 × 28	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
23		32,3	7,4	—	—	12 × 6 × 2 × 75	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24		34,8	9	—	—	12 × 6 × 2 × 75	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
25		34,8	9	—	—	12 × 6 × 2 × 75	0,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
26		33	15	8	—	8 × 2,5 × 1 × 125	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
27		Шатуны СМД-14	33	22	3,5	—	8 × 5 × 1 × 50	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
28	Втулка шатуна	30	12	—	—	8 × 5 × 1,5 × 32	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
29		30	12	—	—	8 × 5 × 1,5 × 32	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
30	Клапанная коробка	30,2	13,2	—	—	6 × 4 × 1 × 40	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
31	Корпус распределителя	31,6	16,1	—	—	6 × 4 × 1 × 100	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
32	Корпус золотника	41,5	17,8	—	—	6 × 4 × 1 × 100	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
33		Направляющая клапана	20,7	9,6	—	—	5 × 3 × 1,5 × 30	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
34	Цилиндр гидроусилителя	34	22	8	—	8 × 3,5 × 1,5 × 30	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Примеры хонингования

Деталь, размеры отверстий D x L, мм	Марка стали	Операция	Параметры хонингования			Характеристика	
			Окружная скорость	Скорость возвратно-поступательного движения	Давление, МПа	Абразивный материал	Зернистость
Зубчатое колесо привода, 8 x 24	20, 56—62 HRC,	—	7,8	4,3	0,4	АС	100/80
			60				
Зубчатое колесо, 61 x 32	25ХГМ, 56—60 HRC,	Предварительная	60	7,2	1,2	АС	200/160
			60				
Вал первичный, 43 x 22	25ХГМ 60—65 HRC,	—	41,5	4,5	0,25—0,3	63С	6
			35				
Зубчатое колесо, 60 x 32	25ХГМ, незакаленная	—	28,7	4,6	1,2	АС	200/160—125/100
			46,3				
Каретка синхронизатора, 38 x 29	25ХГМ, 57—60 HRC,	Шлицевого отверстия					
Блок зубчатых колес, 42 x 160	25ХГМ, 57—60 HRC,	Двух осевых отверстий					

стальных деталей

Таблица 4.16

Концентрация алмазов (%) или твердость	Связка	и размеры брусков			Число брусков в комплекте	Снимаемый припуск на диаметр, мм	Машинное время, с	Отклонение от цилиндричности отверстия, мм		Параметр R <sub>a</sub> , мкм	
		Ширина брусков	Длина брусков	Высота алмазного слоя				до хонингования	после хонингования	до хонингования	после хонингования
50	M1	3	12	1	3	0,02—0,03	30	0,02—0,04	0,02	1,3—4	0,6—2
50	M1	12	40	1	4	0,08—0,12	40—60	До 0,1	0,01—0,015	0,6—1,4	0,25—0,4
50	M1	24	40	1	4	0,02—0,03	30	0,02—0,035	0,006—0,008	0,25—0,4	0,1—0,15
CT2	K	6	15	5	6	0,015—0,03	30—45	0,01	0,01	0,32—0,6	0,14—0,32
T	B	33	25	8	4	0,04—0,05	20	0,02	0,015	2—4	0,6—1,2
50	M1	24	30	1	4	0,10—0,15	30—40	До 0,1	0,01—0,015	0,6—1	0,25—0,35
50	M1	12	40	1	8	0,02—0,03	30	0,01—0,02	0,01—0,015	0,25—0,35	0,1—0,14

Таблица 4.17

чугунных деталей

Концентрация аэрозоль (%) или твердость	Глубина	и размеры брусков			Число брусков в комплекте	Средний припуск на диаметр, мм	Машинное время, с	Отклонение от цилиндричности, мкм		Параметр шероховатости $R_a$ , мкм	
		Концентрация аэрозоль (%) или твердость	Глубина брусков	Высота аэрозольного слоя				до хонингования	после хонингования	до хонингования	после хонингования
50	M1 12	100	1	6	0,06 0,1	35 - 40	0,03	0,02	5	1,25	
C1	B	11	100	9	0,01	10 15	0,02	0,02	1,25	0,32	
50	M1 3,5	11	1	3	0,04... 0,05	8 - 12	0,01	0,03	5	1,25	
50	M1 4	35	1	3	0,04 - 0,05	20	0,01	0,0025	5	0,63	
CT1	K 4	35	3	3	0,003 0,006	15	0,0025	0,0014 0,0025	0,63	0,16	
50	M1 4	25	1	3	0,04 0,05	15	0,01	0,0025	5	0,63	
CT1	K 4	25	3	3	0,003 - 0,005	15	0,0025	0,0015 - 0,0025	0,63	0,16	
50	M1 4	30	1	3	0,01 - 0,02	15	0,01	0,01	1,25	0,32	
50	M1 70	200	1	3	0,04 - 0,05	30 - 40	0,01 - 0,015	0,015 - 0,02	5	0,63	
50	M1 12	80	1	9	0,05 - 0,07	40 - 60	0,01 - 0,02	0,01 - 0,02	5	0,63	
50	M1 12	240	1	5	0,05 - 0,06	60 - 90	0,01 0,02	0,01 0,02	5	0,63	
50	M1 12	40	1	3	0,06 - 0,07	30 - 40	0,01 0,015	0,002 0,005	5	0,63	
50	M1 12	40	1	3	0,005 - 0,01	15 - 25	-	0,002 - 0,005	0,63	0,32	

Примеры хонингования

Деталь, размеры отверстия $D \times L$ , мм	Марка чугуна	Операция	Параметры хонингования		Характеристика	
			Скорость вращения по поступательному движению, м/мин	Давление, МПа	Абразивный материал	Зернистость
Блок цилиндров, 101 X 210	СЧ 15-32	Предварительная	63	3	АС	80/63
		Окончательная	63	0,6	63С	4
Корпус компрессора бытового холодильника, 27 X 42	СЧ 18-36	Предварительная	8,35	2	АС	50/40
		Окончательная	27,7	2	АС	50/40
Поршень компрессора, 16 X 27	СЧ 18-36	Предварительная	27,7	0,6	63С	M14
		Окончательная	14	4,1	АС	50/40
Корпус клапана гидросистемы, 11 X 48	СЧ 18-36	Предварительная	14	0,6	63С	M14
		Окончательная	17,3	0,2	АС	40/28
Картер механизма рулевого управления, 90 X 262	КЧ 35-10	Предварительная	100	2	АС	63/50
		Окончательная	77	0,6	АС	80/63 - 63/50
Блок цилиндров, 79 X 646	СЧ 18-36	Предварительная	70	1,3 - 1,8	АС	40/28
		Окончательная	32,2	0,2	АС	50/40
Корпус клапана управления гидросистемы, 36 X 48	СЧ 18-36	Предварительная	32,3	0,3	АС	28/20
		Окончательная	5,92	0,3	АС	28/20



## Приложение Д «Экспериментальный стенд»

### Модуль тензометрической информации

Основные характеристики модуля:



Рис.1 Расположение и наименование каналов 1, 2, 3 и 4 мостовых датчиков компьютере;

2. Согласно Рис.1 осуществить подключение тензометрических датчиков.

При этом:

- $U_{пит}$  – отрицательная клемма для питания измерительного моста,
- +  $U_{пит}$  – положительная клемма для питания измерительного моста,

- Напряжение питания DC 9...30В;
- Интерфейс Ethernet протокол 10Base-T;
- Количество каналов измерения – 4;
- Минимальное сопротивление тензодатчика 100 Ом;
- Минимальное входное напряжение 1мВ;
- Максимальное входное напряжение 1,5В;
- Максимальная частота измерения 500Гц;
- Количество значащих разрядов – не менее 16.

Подключение модуля.

Подключение модуля состоит из следующих шагов:

1. Развернуть ПО на

- $U_{вх}$  – отрицательный выход измерительного моста,
- +  $U_{вх}$  – положительный выход измерительного моста;

4. Подключить модуль к компьютеру посредством Ethernet кабеля (разъем на Рис.3);

3. Подключить питание модуля.

Структурная схема модуля. Структурная схема модуля представлена на Рис.2. Прибор имеет возможность обрабатывать аналоговый сигнал с четырех тензодатчиков и полученный цифровой код передавать посредством компьютерной сети Ethernet. При этом суммарная скорость преобразования должна составлять не менее 500 преобразований в секунду для всех четырех каналов. Точность составляет не менее 21 разряда. Оцифрованные данные передаются на ЭВМ через сеть Ethernet 10Base-T.



Рис.2 Структурная схема модуля

Устройство состоит из:

- мультиплексора;
- фильтра нижних частот (ФНЧ);
- усилителя;
- 24-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- генератора тактовых импульсов АЦП;
- генератора опорного напряжения АЦП;
- 32-разрядного микроконтроллера;
- Ethernet контроллера.

Измерительная платформа – это платформа содержащая набор тензодатчиков. Далее мультиплексор последовательно переключается, передавая напряжение от тензодатчиков в ФНЧ. Фильтр нижних

частот отфильтровывает высокочастотную составляющую сигнала от тензодатчика. После этого усилитель усиливает сигнал до необходимого АЦП уровня, для преобразования. Аналогово-цифровой преобразователь преобразует аналоговый сигнал в цифровой. АЦП для работы нужны дополнительные сигналы – опорное напряжение (относительно которого формируется выходной цифровой код) и тактовые сигналы. Далее цифровой код передается в микроконтроллер для преобразования и передачи по Ethernet протоколу.

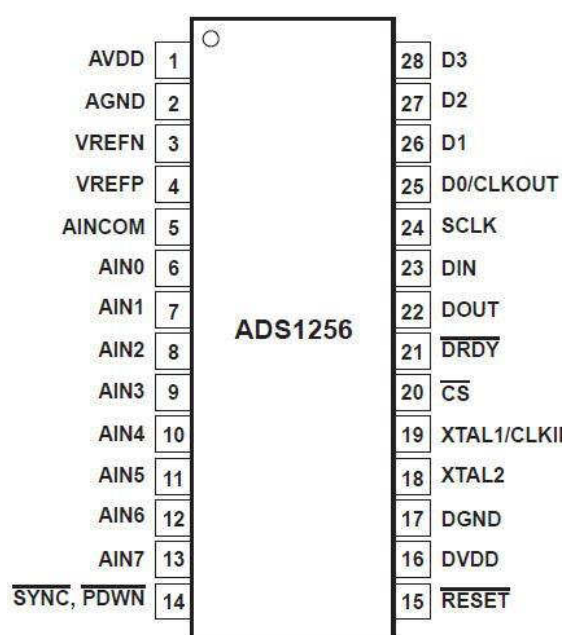


Рис. 3 Назначение выводов микросхемы АЦП

Блок АЦП. В устройстве использовано дельта-сигма АЦП компании Texas Instruments модели ADS1256, у которого назначение выводов микросхемы изображено на Рис. 3. Этот АЦП имеет низкое значение амплитудной величины шума, что является очень важным параметром в электронном измерении, так как определяет гарантированную точность (это количество разрядов, имеющих значение при преобразовании – при большой амплитуде шумов, разрядность может упасть до половины). Также ADS1256 имеет небольшое влияние скорости преобразования в разрядность (во всех АЦП с ростом скорости количество значимых разрядов падает). Еще на количество эффективных разрядов оказывает влияние и коэффициент усиления встроенного усилителя. В общем, количество разрядов имеющих достаточный уровень доверия называются – эффективное количество разрядов. Также этот АЦП требует только внешнего кварцевого генератора для задания тактовой частоты и имеет удобный SPI интерфейс.

Технические характеристики:

- 24 - разрядный АЦП;
- нелинейность 0,0001%

- максимальная частота преобразований 30000 преобразований / секунду;
- амплитуда внесенных шумов 27 нВ;
- само-калибровка усилителя и фильтра;
- SPI интерфейс
- 5 В питания аналоговых цепей и 3,6 В цифровых цепей;
- 38 мВт потребляемая мощность;
- рабочая температура от – 40С до 105С;

На Рис. 4 изображена структурная схема блока АЦП.

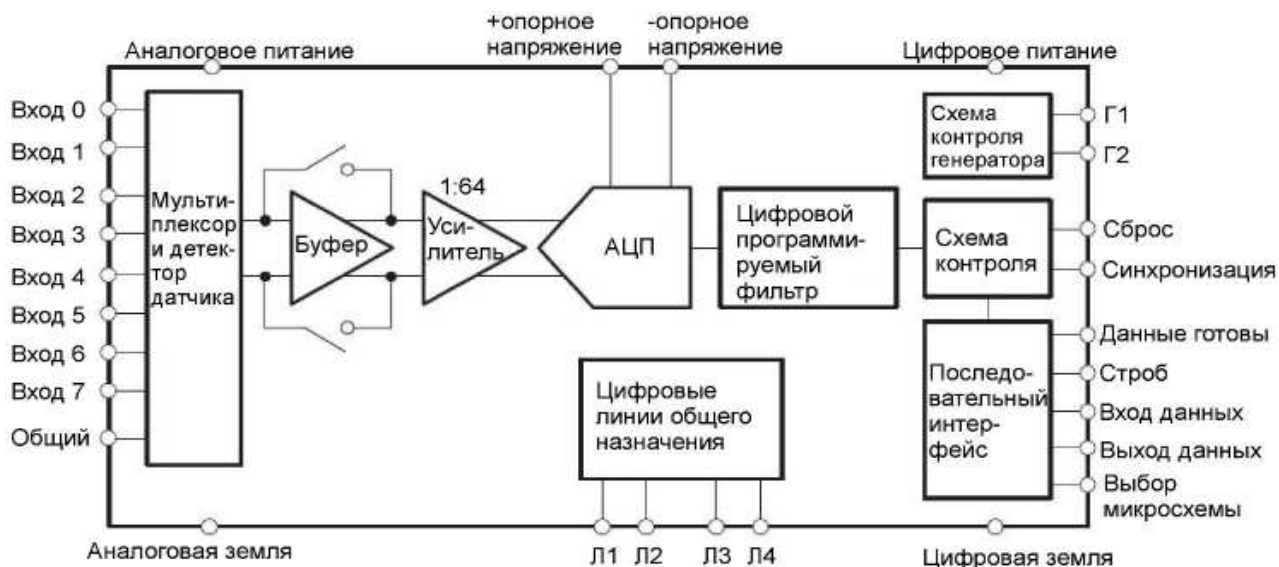


Рис. 4 Структурная схема блока АЦП

Схема входных цепей и подключения микросхемы АЦП представлена на Рис.5 на примере одноканальной микросхемы ADS1255

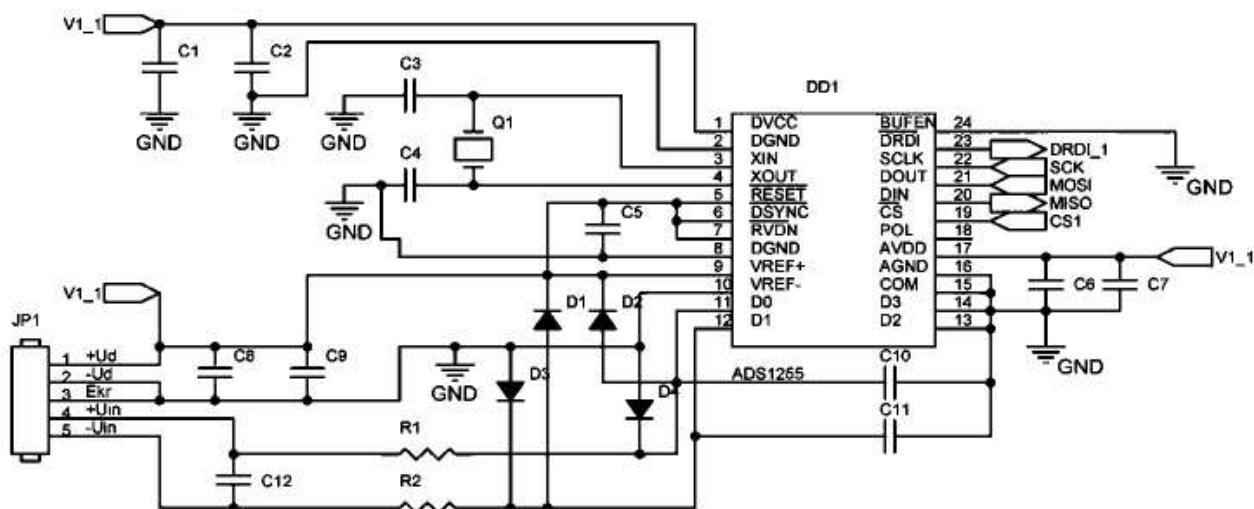


Рис. 5 Схема входных цепей

Модуль Ethernet. Модуль Ethernet работает по стандарту 10Base-T. Использован удобный контроллер ENC28J60 фирмы Microchip. На Рис. 6 назначение изображено назначение его выводов.

Контроллер имеет удобный интерфейс SPI и требует минимум внешних элементов. Важную часть играет сетевой трансформатор, он предназначен для защиты контроллера от перенапряжения.

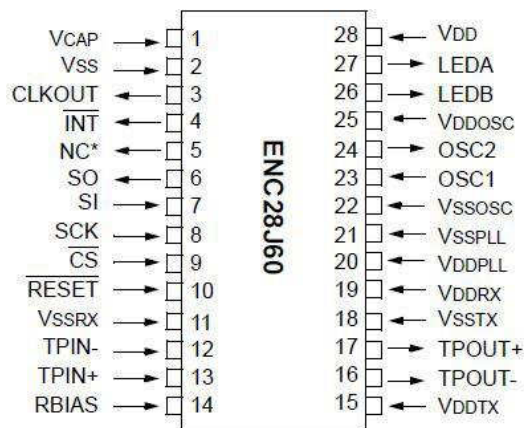


Рис. 6. Назначение выводов Ethernet контроллера

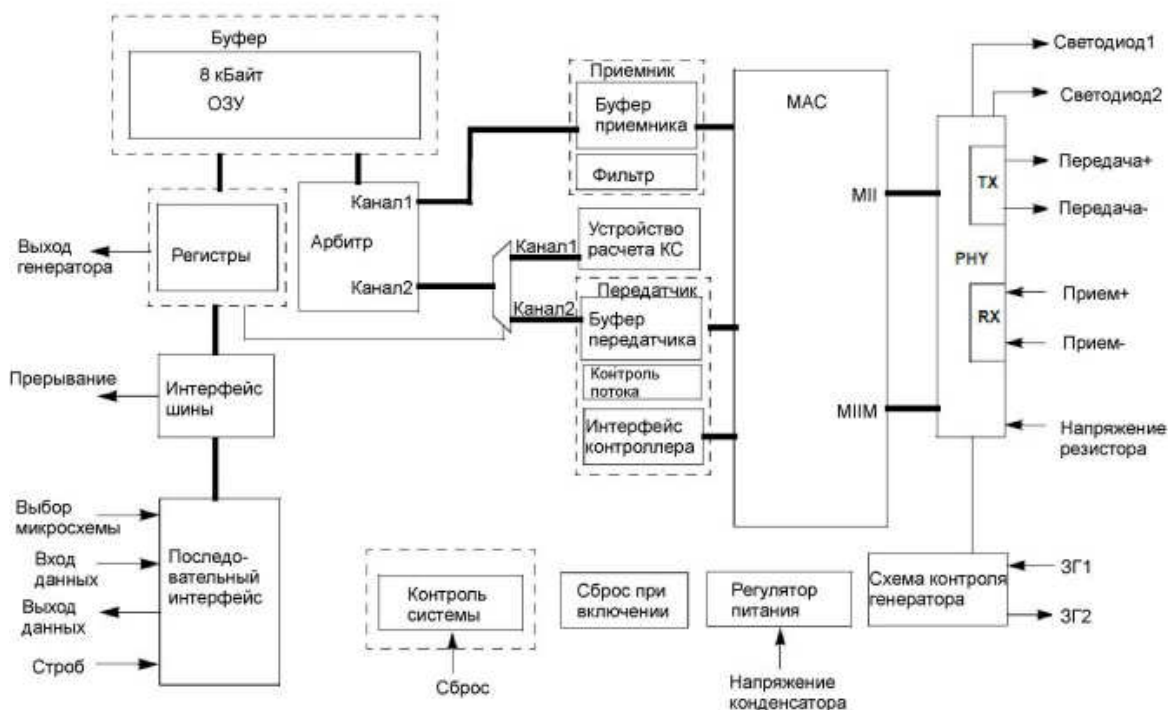


Рис. 7 Структурная схема Ethernet контроллера

Использован коннектор J00-0061NL со встроенным трансформатором.

Технические характеристики:

- совместим со стандартом IEEE 802.3;
- совместим с сетями 10/100/1000Base-T;
- встроенный контроллер MAC и физического уровня Ethernet;
- автоматическое определение и корректировка полярности Ethernet;

- поддержка полно и пола дуплексных режимов;
- автоматическая генерация CRC контрольной суммы в кадре;
- автоматический отклонения поврежденных кадров;
- программные фильтры для фильтрации нежелательных пакетов;
- рабочее напряжение от 3,3 В до 3,6 В;
- рабочая температура от -40С до 105С.

На Рис. 7 представлена структурная схема контроллера.

Алгоритм функционирования модуля. Блок-схема алгоритма функционирования модуля представлена на рис.8

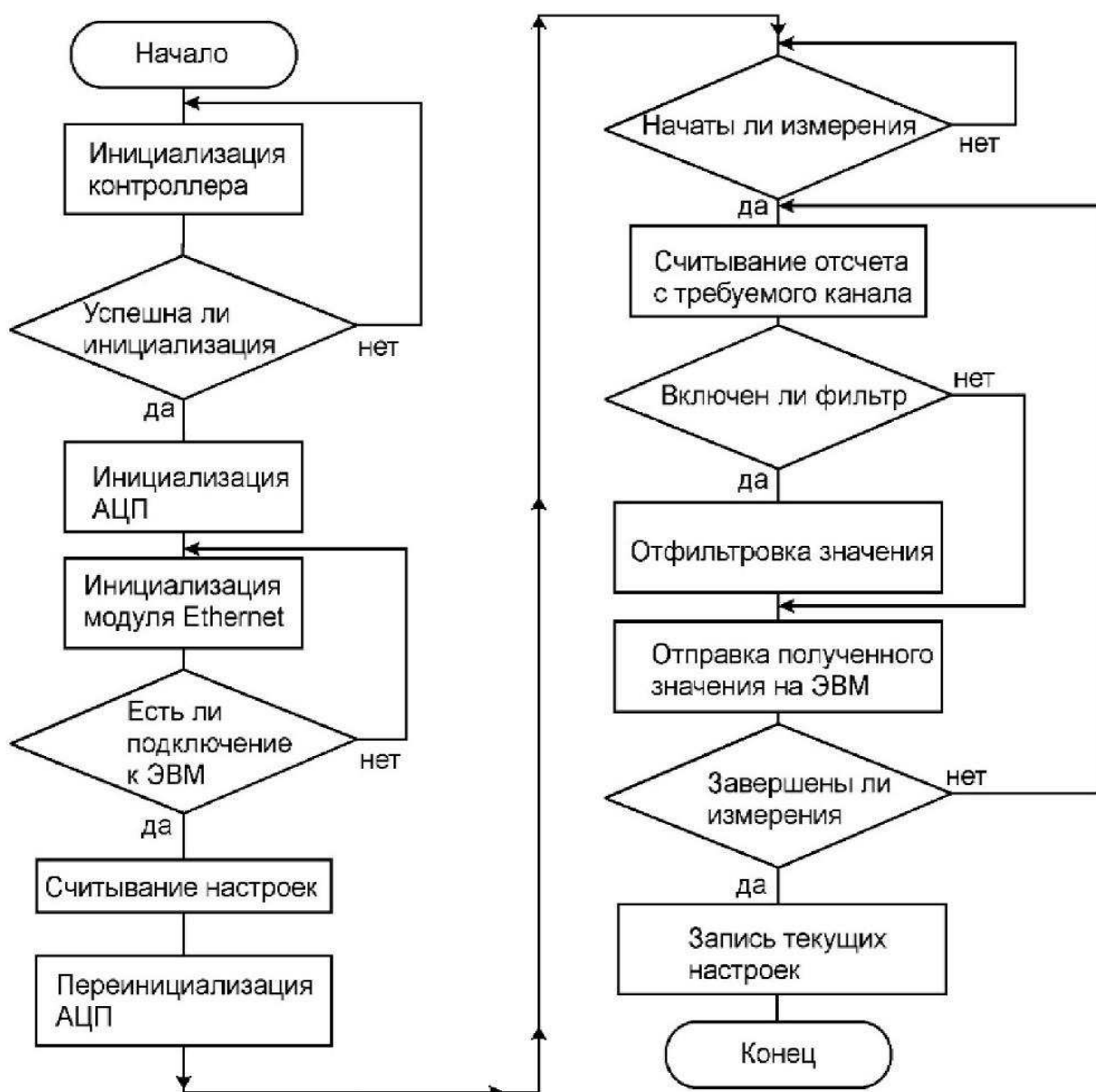
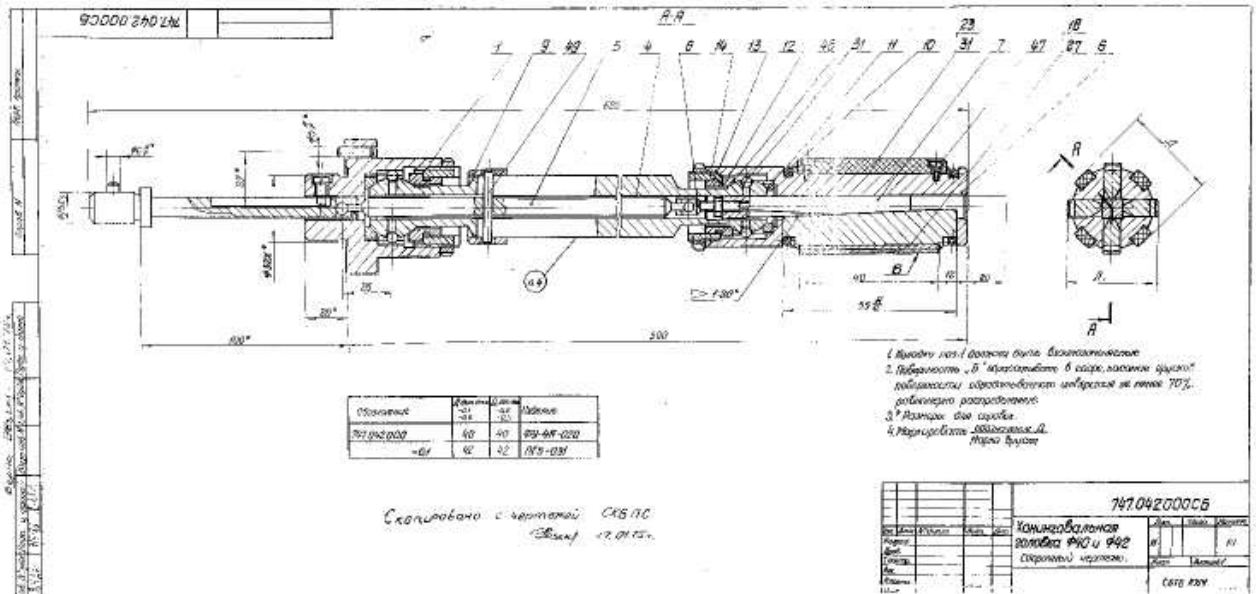


Рис.8 Блок-схема алгоритма работы модуля

### Тензометрический стол



### Хонингования головка



Динамометрический ключ RWDF 12

Индикатор с стойкой 18 – 50 мм  
ГОСТ 9244 – 75