

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ЗОЛОТНИКОВОЙ ПАРЫ

Д.В. Ардашев, ardashev dv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>

А.С. Жуков, zhukovas@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье подробно рассматриваются конструкция изделия «Высокоточная золотниковая пара» и особенности разработанного технологического процесса изготовления его компонентов. Проанализированы основные этапы механической обработки изделий «Гильза» и «Золотник», термическая обработка, технический контроль, а также технологические приемы по выполнению предъявляемых технических требований. Во введении приводится обоснование актуальности подробного рассмотрения особенностей реализации технологического процесса производства высокоточной золотниковой пары. Данный узел входит в состав электрогидравлического усилителя мощности – важнейшего элемента управления специальных гидроприводов, применяющихся в стендовом испытательном оборудовании. Основное содержание работы сосредоточено на описании технических и технологических особенностей изготовления компонентов высокоточной золотниковой пары. Приведены основные элементы материально-технического оснащения технологического процесса, с помощью которых реализуется микрообработка и обеспечиваются высокие требования точности и качества изделия: применяющееся оборудование, станочная оснастка и режущий инструмент. Отдельно в статье описывается операция криообработки деталей, уделяется внимание испытаниям готовых изделий, приведены условия, при которых изготовленный узел будет нуждаться в доработке и при которых изделие будет считаться годным.

В статье преследуется цель дать полное описание технологии изготовления компонентов высокоточной золотниковой пары, призванное раскрыть необходимость применения приемов и методов достижения высокой точности сопряжения. Основным методом достижения цели выступает подробный анализ всех аспектов технологического процесса изготовления компонентов высокоточной золотниковой пары. Выявляются нестандартные и редко применяющиеся решения, устанавливаются причины, вызвавшие необходимость их применения. Основным прикладным результатом работы может считаться подробный проиллюстрированный инженерно-технический отчет с описанием особенностей производства рассматриваемого узла.

Ключевые слова: золотниковая пара, электрогидравлический усилитель мощности, специальные гидроприводы, испытательные стенды, испытательное оборудование, высокочастотные испытания, вибрационные стенды, ресурсные стенды, технологическое обеспечение высокой точности

Для цитирования: Ардашев Д.В., Жуков А.С. Технологические особенности изготовления высокоточной золотниковой пары // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 3. С. 38–52. DOI: 10.14529/engin240304

Original article

DOI: 10.14529/engin240304

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING A HIGH PRECISION SPOOL PAIR

D.V. Ardashev, ardashevdv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>**A.S. Zhukov**, zhukovas@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9328-7148>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article deals in detail with the design of the product “High-precision spool pair” and the features of the developed technological process of manufacturing its components. The main stages of mechanical processing of products “Sleeve” and “Spool”, heat treatment, technical control, as well as technological methods to meet the technical requirements are analyzed. In the introduction the justification of the relevance of detailed consideration of the features of the implementation of the technological process of production of high-precision spool pair is given. This unit is a part of electrohydraulic power amplifier – the most important control element of special hydraulic drives used in bench test equipment. The main content of the work is focused on the description of technical and technological peculiarities of manufacturing components of high-precision spool pair. The basic elements of material and technical equipment of the technological process are given, by means of which micromachining is realized and high requirements of accuracy and quality of the product are provided: applied equipment, machine tooling and cutting tools. Separately, the article describes the operation of cryoprocessing of parts, pays attention to the testing of finished products, gives the conditions under which the manufactured unit will need rework and under which the product will be considered fit for purpose.

The article aims to provide a complete description of the manufacturing technology of high-precision spool pair components, designed to reveal the need to apply techniques and methods to achieve high mating accuracy. The main method of achieving the goal is a detailed analysis of all aspects of the technological process of manufacturing components of high-precision spool pair. Non-standard and rarely used solutions are revealed, the reasons that caused the necessity of their application are established. The main applied result of the work can be considered a detailed illustrated engineering report describing the peculiarities of production of the considered unit.

Keywords: spool pair, electro-hydraulic amplifier, special hydraulic drives, test benches, bench equipment, high-frequency testing, vibration test benches, life test benches, precision engineering

For citation: Ardashev D.V., Zhukov A.S. Technological features of manufacturing a high precision spool pair. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024:24(3):38–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240304

Введение

Прежде чем приступить к серийному выпуску того или иного продукта, необходимо произвести проверку определенных его свойств на предмет их соответствия установленным требованиям. Когда речь идет о разработке высокотехнологичной, высококачественной и высокоточной продукции, этап испытаний особенно важен и не игнорируется никогда, поскольку от его результатов зависит, будет ли продукт запущен в производство или отправлен на доработку. Часто для проведения испытаний применяется специальное оборудование, которое может имитировать условия работы продукта. Это оборудование проектируется таким образом, чтобы у оператора – инженера-испытателя была возможность управлять режимами воздействия на объект испытаний для полноценного анализа данных результатов исследования [1].

В зависимости от сложности устройства объекта испытаний и от условий его эксплуатации к испытательному оборудованию, задействованному в проверке, могут предъявляться более и или менее высокие требования. Сегодня с ростом научно-технического прогресса конструкция изделий машиностроительной и других отраслей становится все более сложной, что влечет за собой помимо прочего и значительное повышение требований к испытательному оборудованию [2]. Вследствие этого разработка испытательных стендов и высокоточных компонентов для них явля-

ется достаточно актуальной задачей. Наиболее распространенными типами испытательных стендов являются ресурсные и вибрационные стенды.

Ресурсные испытания в обязательном порядке проводятся на этапе разработки изделия и направлены на то, чтобы определить ресурс надежности объекта испытаний или срок его эксплуатации. Ресурсные стенды позволяют симитировать определенную нагрузку на объект, которой он будет подвергаться в процессе эксплуатации. Такая нагрузка часто является в разы более интенсивной, чем реальное воздействие при эксплуатации объекта. Это делается для того, чтобы сократить время испытаний. Испытания по определению ресурса надежности продолжаются до тех пор, пока изделие не достигнет определенного числа отказов или окончательно потеряет возможность выполнять свое служебное назначение (разрушение). В процессе испытаний регистрируются как параметры воздействий, оказываемых на объект, так и отклик самого объекта. Дальнейший анализ и интерпретация полученных данных позволяет с достаточной точностью спрогнозировать ресурс надежности и долговечность продукта.

Ресурсные стенды имеют широкое применение в технике: от судостроения и агроинженерной отрасли [3, 4] до авиации и космонавтики [5–7].

Эксплуатация большого количества разнообразной техники, устройств, аппаратуры очень часто бывает сопряжена с вибрационными воздействиями [8]. Поэтому вторым наиболее популярным классом испытательного оборудования являются вибрационные стенды. Всего выделяют два основных вида испытаний, проводимых на вибростендах: проверка на виброустойчивость и на вибропрочность.

Виброустойчивость определяется как свойство объекта выполнять свое служебное назначение и сохранять значения своих параметров в пределах норм при вибрационном воздействии заданного уровня. Вибропрочность, в свою очередь, заключается в способности объекта сопротивляться разрушению во время вибрационной нагрузки и после ее снятия.

Таким образом, из определений ясно, что проведение вибрационных испытаний позволяет выявить несовершенства конструкции изделий на этапе разработки. Принципиально важно, что обнаружить эти недостатки без вибрационных испытаний стало бы возможным лишь в процессе эксплуатации, а это привело бы к значительным экономическим издержкам. Основная задача проведения испытаний с применением вибрационных стендов состоит в выявлении критических значений устойчивости приборов, механизмов и аппаратуры к вибрационным воздействиям различных параметров. Испытания могут проводиться как над оборудованием целиком, так и над отдельными его узлами, если это целесообразно для конкретных условий.

Применение вибрационным стендам часто находится в сферах летательных аппаратов, авиационной и ракетной техники [9–11]. Актуальность таких испытаний постоянно возрастает, поскольку от корректности работы аппаратуры в условиях жестких вибраций на воздушном судне могут зависеть жизни людей.

Так, стендовые испытания являются необходимым элементом жизненного цикла изделия во множестве отраслей производства. Отдельно отметим автомобилестроение, бурно развивающееся с середины прошлого века и регулярно прибегающее к стендовым испытаниям, в особенности при испытаниях тормозной системы [12] и системы подвески автомобиля [13].

Машиностроение не обходится без этапа испытаний при разработке достаточно ответственных или конструктивно сложных изделий [14]. При этом простые и распространенные изделия часто подвергаются испытаниям на специальных стендах. Особое место уделяется испытаниям подшипников [15, 16] как важнейшему элементу, входящему в состав практически любой машины или механизма. При этом подшипники могут испытываться как на ресурсных, так и на вибрационных стендах. Стоит также упомянуть о важной для жизни и здоровья людей аппаратуре, также испытывающей необходимость в обязательной проверке до запуска в массовое производство и применяющееся в медицине [17].

Из приведенных выше доводов, видно, что проектирование специального стендового оборудования становится важнейшей задачей в мире современной высокоточной техники. Стендовые испытания сложных машин, агрегатов, конструкций и деталей, применяющихся в авиа-, судо-, двигателе- и ракетостроении, сельском хозяйстве, нефте- и газодобывающей и космической отраслях, проводятся с помощью оборудования, которое функционирует за счет работы специальных гидроприводов (ГП) и обеспечивает нагрузку на объект испытаний.

Среди требований к современным высокотехнологичным гидроприводам наиболее важным является высокий ресурс таких агрегатов. В ходе испытаний объект должен подвергнуться более чем 100 млн циклам строго контролируемых нагрузений. Контроль и управление режимами работы ГП и ходом испытаний ведется с помощью специальных электрогидравлических усилителей мощности (ЭГУМ), преобразующих электрический сигнал задания в механическое перемещение золотника с требуемой частотой и амплитудой, который передает характеристики нагружения на ГП и далее – на объект испытаний. В данной статье мы рассматриваем такой важный компонент конструкции ресурсных и вибрационных стендов, как высокоточная золотниковая пара.

Высокоточная золотниковая пара (ВЗП) является ключевым и наиболее ответственным элементом ЭГУМ, специального ГП и испытательного стенда в целом. Повышенные требования к качеству изготовления стендов наследуются всеми его составными частями, в частности ВЗП и ее компонентов – гильзы и золотника.

При разработке технологии изготовления ВЗП перед инженером встает серьезная задача по обеспечению высокой точности изготовления. Предельно допустимые зазоры золотниковой пары для обеспечения требуемого функционала ГП не должны превышать 5 мкм. Для удовлетворения этих требований в технологии производства предусмотрено применение микрообработки, специализированного оборудования, оснастки и инструмента.

Целью данной статьи является детальное описание технологии изготовления компонентов высокоточной золотниковой пары, призванное раскрыть необходимость применения приемов и методов достижения высокой точности сопряжения. В работе рассматриваются: особенности механической обработки гильзы и золотника (с приведением технологии в виде маршрутной карты с иллюстрациями), термическая обработка, технический контроль готовой продукции, испытания на функциональность, операция доработки золотника, селективная сборка ВЗП.

Технологический процесс обработки комплектующих ВЗП

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Анализ технологичности компонентов ВЗП показал, что существует ряд трудностей при механической обработке гильзы и золотника (рис. 1). Главным образом эти трудности связаны с малыми размерами ВЗП и высокой точностью сопряжения гильза – золотник. Габаритные размеры ВЗП в сборе составляют $\varnothing 20 \times 112$ мм. При этом исполнительные поверхности гильзы выполнены с точностью диаметральных размеров по 7–10 квалитетам, линейных размеров – по 5–8 квалитетам. Требования к точности формы гильзы (цилиндричность) – 0,005 мм, требования к точности взаимного расположения поверхностей (концентричность (соосность)) – 0,005 мм, требования суммарного допуска на форму и расположение поверхностей (радиальное биение) – 0,005 мм.

Точность размеров золотника соответствует 6–9 квалитетам. Для золотника конструктором заданы только требования радиального и торцевого биения, и они составляют аналогично 0,005 мм. Требования шероховатости исполнительных поверхностей гильзы и золотника заданы значением Ra 0,1.

Приведенные требования точности и качества поверхностей деталей ВЗП вызывают необходимость применения специального технологического оборудования, оснастки и режущего инструмента, проработки технологии изготовления гильзы и золотника тщательным образом.

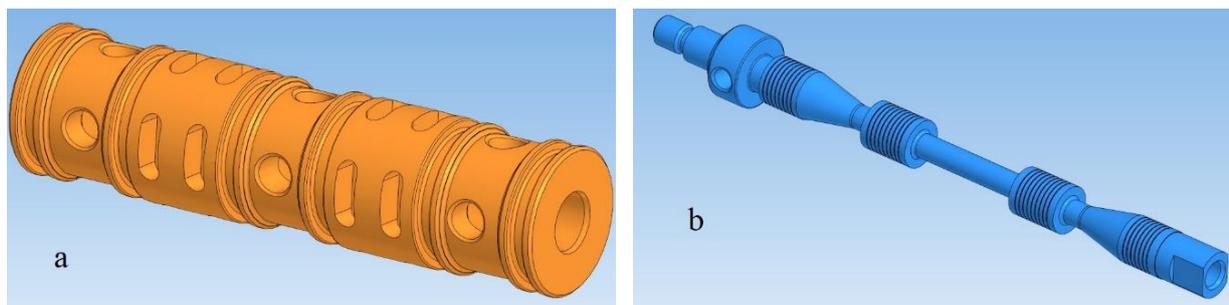


Рис. 1. Компоненты высокоточной золотниковой пары: а) гильза; б) золотник

Fig. 1. Components of a high precision spool pair: a) sleeve; b) spool

Высокая точность сопряжения ВЗП (рис. 2, а) вызвана необходимостью герметичной работы гидропривода. В положении, при котором золотник перекрывает впускные и выпускные каналы гильзы (рис. 2, b), рабочая жидкость, нагнетаемая при максимальном рабочем давлении 35 МПа, должна полностью прекращать свое движение по каналам ГП.

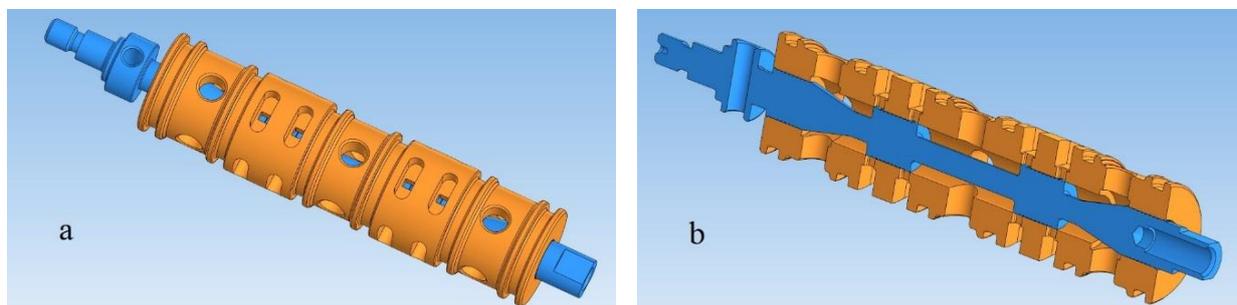


Рис. 2. Высокоточная золотниковая пара: а) в сборе; б) в разрезе
Fig. 2. High precision spool pair: a) assembly; b) cross-section

Далее читателю предлагается ознакомиться с технологическими процессами изготовления гильзы (п. 1.1) и золотника (п. 1.2), однако во избежание нарушения коммерческой тайны на приведенных иллюстрациях не отображены значения и допуски выполняемых размеров (рис. 3–18). Кроме того, в статье не рассматриваются значения режимов механической и других видов обработки. Последовательность выполнения технологических операций и переходов приведена без изменений (табл. 1, 2).

1.1. Гильза

В табл. 1 представлена последовательность технологических операций для производства детали «Гильза», приведено оборудование, применяемое для каждой из операций, а также штучное время. Рис. 3–10 демонстрируют операционные эскизы механической обработки (для прочих операций эскизы не предусмотрены). На операционных эскизах указаны принципиальные схемы базирования заготовки в станочном приспособлении, красными линиями обозначены обрабатываемые в рамках конкретной операции поверхности, приведены размеры (без значений и допусков), значения шероховатости обрабатываемых поверхностей и требования к точности формы, взаимному расположению поверхностей.

Рассмотрим особенности операций механической обработки подробнее.

В качестве заготовки целесообразно использовать горячекатаный калиброванный пруток круглого сечения диаметром 25 миллиметров (см. рис. 3). Отрезка прутка осуществляется на ножовочном станке с применением откидного упора так, чтобы длина отрезанной заготовки превышала габарит детали не более чем на 10 мм для последующей обработки обоих торцов.

Удаление основного объема припуска осуществляется на комплексной операции с применением токарного обрабатывающего центра (ОЦ) с числовым программным управлением (ЧПУ) Z-MAT DT350E (см. рис. 4–7). За счет направляющих цилиндрического типа и высокоточного шарикового винта большого диаметра данный станок обеспечивает повышенную жесткость и позволяет осуществлять обработку миниатюрных деталей с высокой точностью. Эта возможность станка особенно актуальна для обработки комплектующих ВЗП, поскольку требованием чертежа задана минимальная точность обработки поверхностей – не ниже 10-го качества. При обработке деталей малых размеров допуски на обработку составляют сотые доли миллиметра.

Также эта модель станка оснащена шпинделем с прямым приводом, который достигает высокой скорости при сохранении строгой жесткости и исключительной точности по оси С. Имеется револьверная голова с приводным инструментом. Поскольку при изготовлении детали требуется выполнить ряд радиальных отверстий (12 сквозных отверстий круглой формы и 16 глухих пазов), наличие приводного инструмента и жесткости координирования угловых перемещений является необходимым требованием, предъявляемым к оборудованию.

Маршрутный технологический процесс производства детали «Гильза»

Таблица 1

Table 1

The route technological process of manufacturing a sleeve

Номер операции	Код и наименование операции	Применяемое оборудование	T _{шт.} , мин	Операционный эскиз
005	4281 Ножовочно-отрезная	8725 Станок ножовочный	0,4	Рис. 3
010 Установ А	4237 Комплексная на ОЦ с ЧПУ	Z-MAT DT350E Токарный станок с ЧПУ (станок специальный повышенной точности)	72,3	Рис. 4
010 Установ Б				Рис. 5
010 Установ В Позиции 1, 2, 3, 4				Рис. 6, 7
015	5030 Закалка	Печь прокалочная муфельная ПК50	180	–
020 Установ А	4131 Круглошлифовальная	Станок шлифовальный НОД4-SP (для наружного шлифования)	22,1	Рис. 8
020 Установ Б				–
025	4132 Внутришлифовальная	Станок шлифовальный НОД4-SP	17	Рис. 9
030 Позиции 1, 2	7509 Профильно-вырезная	Электроэрозионный проволочно-вырезной станок Sodick AQ300L	45	Рис. 10
035	Криообработка	Криогенная камера КП-0,04	120	–
040	0200 Контроль	Верстак тяжелый ПРАКТИК Expert WTH200.WS6.WS1.010	45	–
045	0615 Испытания на функциональность	Стенд гидравлической проливки для проведения исследовательских испытаний макетов ВЗП СВЗП10-00.000	–	–
050	0189 Маркирование электроэрозионное	Электроискровой маркер Аркограф ARGLO A50/6	5	–

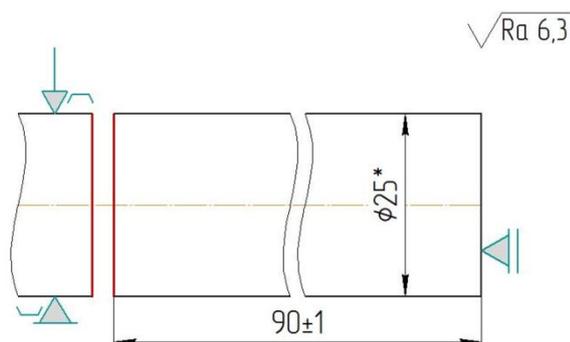


Рис. 3. Операция 005 Ножовочно-отрезная
Fig. 3. Hacksaw-cutting operation 005

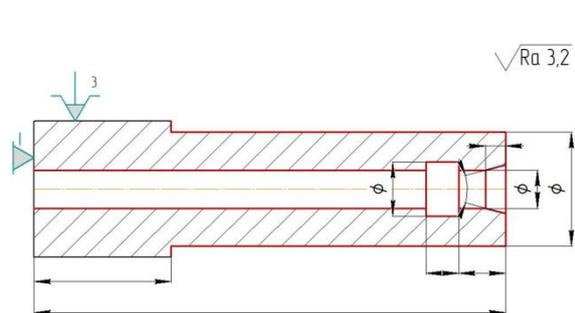


Рис. 4. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ А
Fig. 4. Complex operation 010 with CNC, setup A

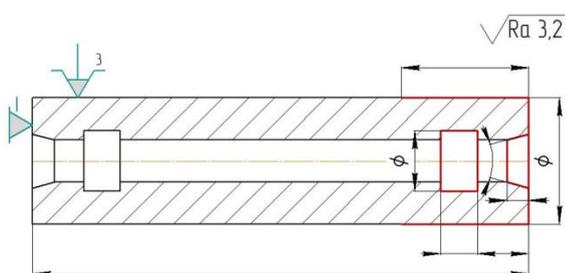


Рис. 5. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ Б
Fig. 5. Complex operation 010 with CNC, setup B

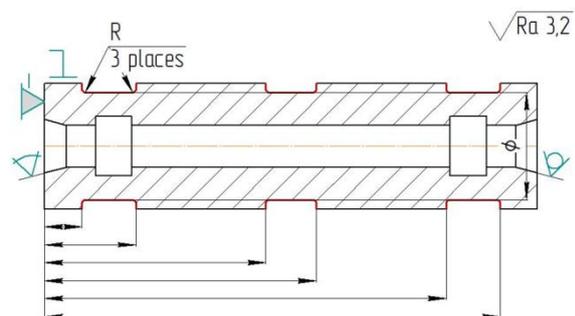


Рис. 6. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ В
Fig. 6. Complex operation 010 with CNC, setup C

Всего на комплексной на ОЦ операции с ЧПУ реализовано три установка (литеры А, Б, В). На установках А (см. рис. 4) и Б (см. рис. 5) используется патрон самоцентрирующий трехлапчатый (Патрон 7100-0007 ГОСТ 2675–80), базирование с упором по торцу. За два установка проводится предварительная подрезка двух торцов, обработка наружной цилиндрической поверхности, сверление осевого отверстия и расточка внутренних канавок и внутренних конусов. Поскольку соотношение длины сверла к его диаметру с учетом значений недобега и перебега составляет 12,5, существует вероятность возникновения увода сверла, следовательно, необходимо использовать точно рассчитанные режимы резания, а также применять дополнительный переход с центровочным сверлом. Качественная обработка конических отверстий также важна в связи с тем, что в дальнейшем эти поверхности используются в качестве комплекта баз с применением комплекта центров (вращающегося и плавающего). Обработка на установке В подразумевает базирование именно в двух центрах и с упором по торцу (со стороны плавающего центра). При этом вращение передается заготовке от шпинделя через поводковый патрон. В рамках установки В осуществляется не только токарная обработка наружного профиля заготовки (см. рис. 6), но и фрезерный переход для обработки пазов, а затем сверлильный переход для обработки радиальных отверстий (см. рис. 7). Обработка сверлильных и фрезерных переходов ведется за четыре последовательные позиции (позиции 1, 2, 3, 4, см. табл. 1) с поворотом заготовки совместно с трехлапчатым патроном на 90° .

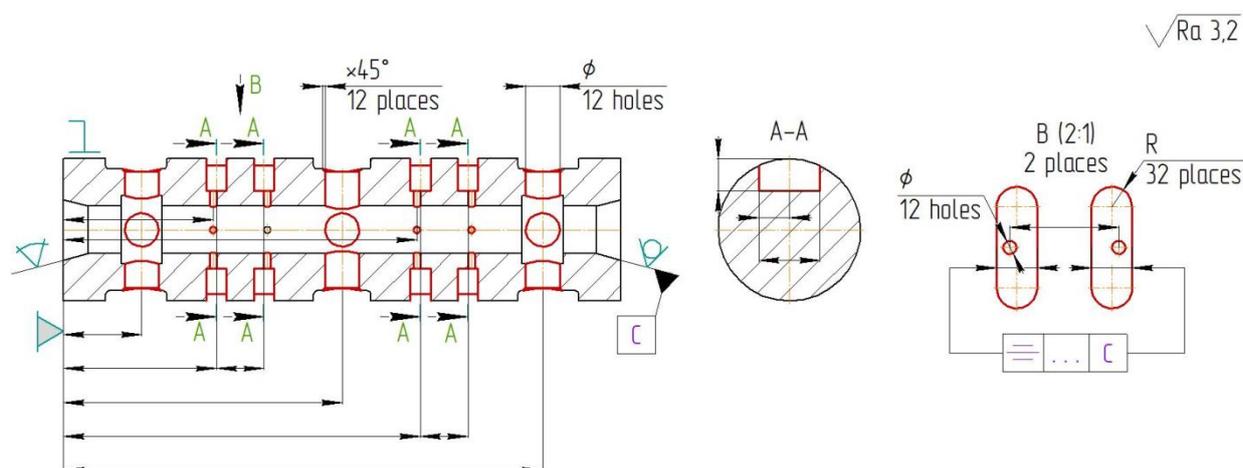


Рис. 7. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ В, позиция 4
Fig. 7. Complex operation 010 with CNC, setup C, position 4

Перед чистовым этапом обработки с помощью абразивных методов основному материалу необходимо придать высокую твердость. Требованием чертежа установлена твердость 60...63 HRC. Применяется объемная закалка в прокаличной муфельной печи ПК50.

На круглошлифовальной (см. рис. 8) и внутришлифовальной (см. рис. 9) операциях достигается требуемая точность поверхностей детали. Требования точности размеров, точности форм и их взаимного расположения достаточно высоки, поэтому необходимо применение специализированного шлифовального инструмента. Так, на операции 020 используются шлифовальные круги, имеющие специальную форму рабочей поверхности для обработки канавок и фасок.

На круглошлифовальной операции производится окончательная обработка торцов детали за два установка (на операционном эскизе изображен только установ А), где достигается окончательный габаритный размер гильзы, требования по его точности и суммарный допуск формы и взаимного расположения (допуск полного биения). В качестве станочной оснастки здесь применяется цанговый патрон с цангой малого диаметра, работающей на разжим.

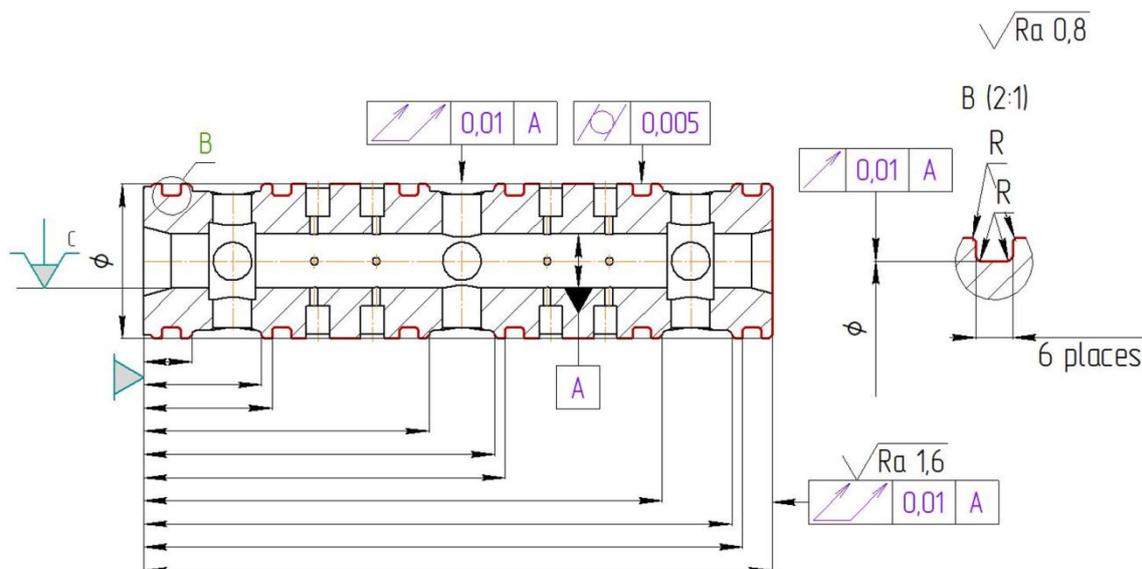


Рис. 8. Операция 020 Круглошлифовальная, установ А
 Fig. 8. Cylindrical grinding operation 020, setup A

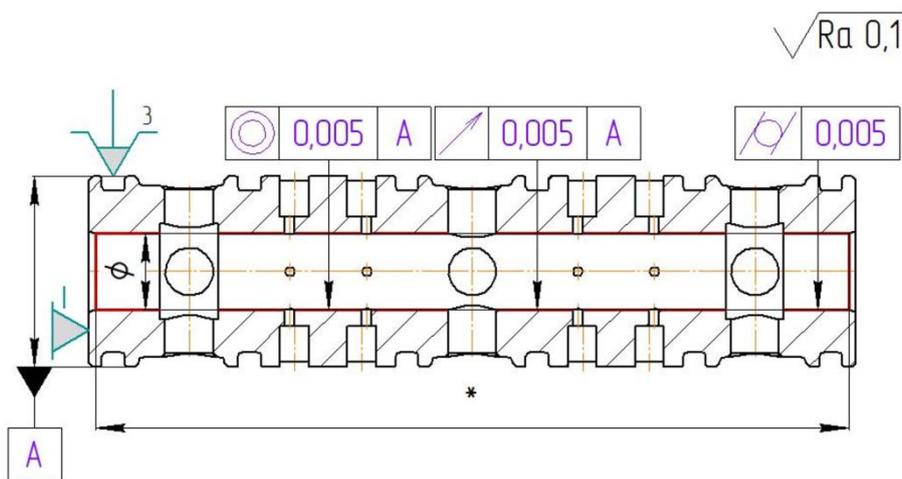


Рис. 9. Операция 025 Внутришлифовальная
 Fig. 9. Internal grinding operation 025

Для реализации профильно-вырезной операции с применением проволочного электрода задается прецизионный электроискровой (электроэрозионный) проволочно-вырезной погружной станок Sodick AQ300L (см. рис. 10). Данное оборудование обладает встроенной системой ЧПУ, позволяет обеспечить обработку окон высокой точности и удовлетворяет установленным конструкторским требованиям. Базирование заготовки осуществляется с применением трехлапчатого патрона с упором по торцу. Угловая координата определяется с помощью цилиндрической оправки через контакт по пазу. Операция предусматривает последовательное выполнение двух позиций (позиции 1, 2, см. табл. 1) с поворотом заготовки на 180°, в ходе каждого из которых последовательно формируются 4 пары окон. Для этого проволочный электрод пропускается через предварительно выполненные отверстия (см. рис. 7).

Следует также отметить, что деталь «Гильза» изготавливается в трех исполнениях, отличающихся размерами окон, которые выполняются на этой операции. Различные геометрические параметры окон (см. рис. 10, параметр l) предусмотрены для обеспечения более широкого диапазона характеристики максимального расхода рабочей жидкости.

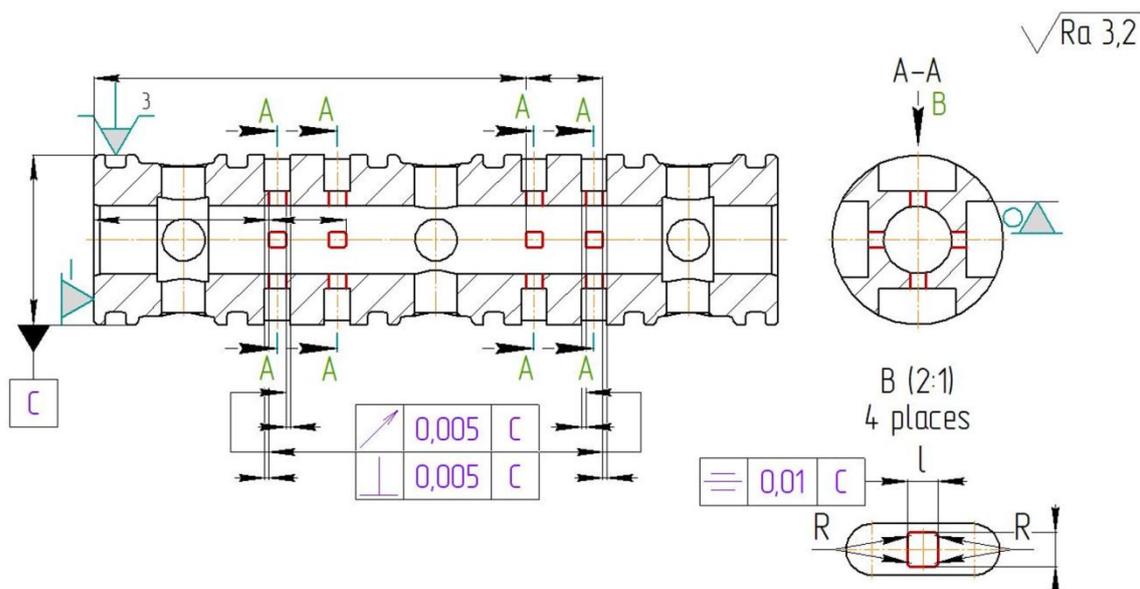


Рис. 10. Операция 030 Профильно-вырезная изготовления гильзы, позиция 2
Fig. 10. Profile cutting operation 030 of sleeve manufacturing, position 2

1.2. Золотник

В табл. 2 представлен маршрутный технологический процесс производства детали «Золотник», аналогичный рассмотренному выше для детали «Гильза».

Заготовкой для золотника служит горячекатаный калиброванный пруток круглого сечения диаметром 16 миллиметров (см. рис. 11). Отрезка прутка также выполняется на ножовочном станке с применением откидного упора. Габарит отрезанного прутка превышает габарит детали на 6 мм для подрезки торцов на установках операции «Комплексная на ОЦ с ЧПУ».

Операция комплексная на ОЦ с ЧПУ предназначена для предварительного формирования поверхностей детали с последующей финишной обработкой. Для этого применяется то же оборудование, что и для лезвийной обработки гильзы (повторно рассматривать возможности станка здесь не будем). Комплект станочной оснастки также аналогичен.

Комплексная операция 010 на ОЦ с ЧПУ включает четыре установка (литеры А, Б, В, Г). В рамках этих переходов также удаляется основной объем припуска.

На установках А (см. рис. 12) и Б (см. рис. 13) заготовка базируется на станке с помощью патрона самоцентрирующего трехкулачкового с упором по торцу. В рамках этих двух установок необходимо произвести большую часть предварительной лезвийной обработки, включая нарезку резьб и обработку внутренних конусов.

Далее на установке В производится замена станочной оснастки на комплект центров (см. рис. 14). Используется плавающий центр и центр вращающийся, при этом линейные размеры отсчитываются от упора по торцу. Трудностью при обработке в рамках установка В является обработка 28 канавок на исполнительной поверхности золотника шириной 0,15 мм. Требуется спроектировать и изготовить специальный резец для обработки радиальных канавок требуемой ширины. В процессе обработки даже небольшой партии таких деталей важно постоянно отслеживать износ резца во избежание возникновения брака. По завершении токарной обработки оставлены припуски для чистовой шлифовальной операции. Кроме токарных переходов в рамках установка В выполняется сверление (см. рис. 15) со сменой позиции поворотом заготовки на 180° для обработки фасок отверстия (позиции 1, 2, см. табл. 2).

На установке Г производится фрезерование двух уступов также со сменой позиции (позиции 1, 2, см. табл. 2) поворотом заготовки на 180°. Для правильной ориентации уступов относительно просверленного радиального отверстия используется базирование по цилиндрической оправке (см. рис. 16).

Маршрутный технологический процесс производства детали «Золотник»

Таблица 2

Table 2

The route technological process of manufacturing a spool

Номер операции	Код и наименование операции	Применяемое оборудование	T _{шт.} , мин	Операционный эскиз
005	4281 Ножовочно-отрезная	8725 Станок ножовочный	0,4	Рис. 11
010 Установ А	4237 Комплексная на ОЦ с ЧПУ	Z-MAT DT350E Токарный станок с ЧПУ (станок специальный повышенной точности)	42,2	Рис. 12
010 Установ Б				Рис. 13
010 Установ В Позиции 1, 2				Рис. 14, 15
010 Установ Г Позиции 1, 2				Рис. 16
015	5030 Закалка	Высокочастотная ТВЧ установка на транзисторном IGBT модуле ВЧ-40АВ	15	–
020	4131 Круглошлифовальная	Станок шлифовальный HOD4-SP (для наружного шлифования)	12,5	Рис. 17
025	4196 Полировальная	Станок шлифовальный HOD4-SP	16	Рис. 18
030	Криообработка	Криогенная камера КП-0,04	120	–
035	0200 Контроль	Верстак тяжелый ПРАКТИК Expert WTH200.WS6.WS1.010	45	–
040	0615 Испытания на функциональность	Стенд гидравлической проливки для проведения исследовательских испытаний макетов ВЗП СВЗП10-00.000		–
045	4130 Торцешлифовальная	Станок шлифовальный HOD4-SP (для наружного шлифования)		–
050	0189 Маркирование электроэрозионное	Электроискровой маркер Аркограф ARGLO A50/6	5	–

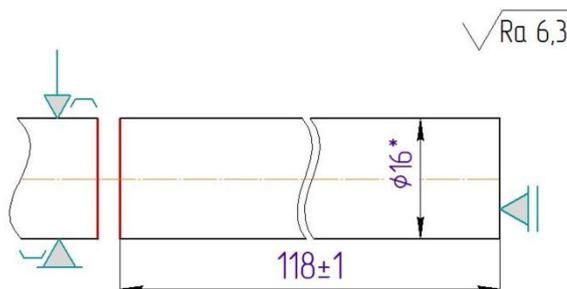


Рис. 11. Операция 005 Ножовочно-отрезная
Fig. 11. Hacksaw-cutting operation 005

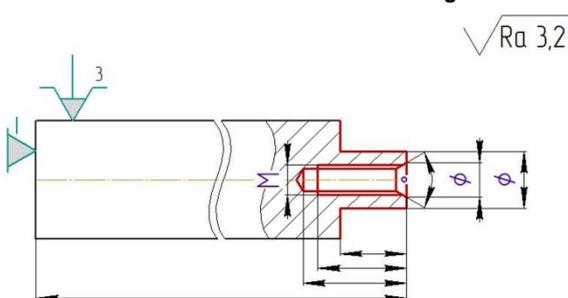


Рис. 12. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ А
Fig. 12. Complex operation 010 with CNC, setup A

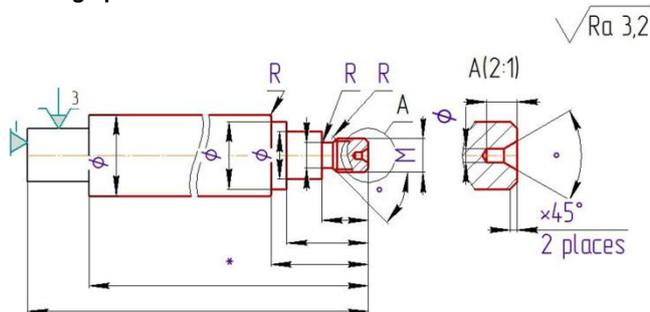


Рис. 13. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ Б
Fig. 13. Complex operation 010 with CNC, setup B

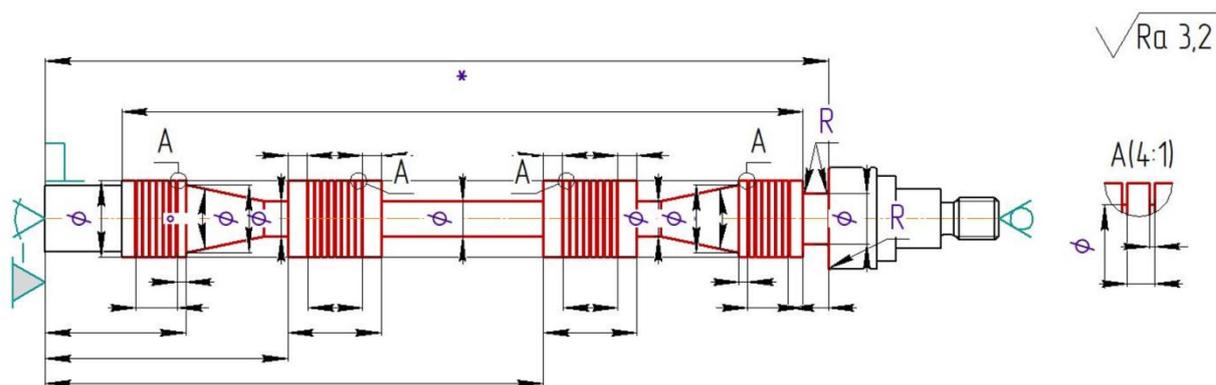


Рис. 14. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ В
Fig. 14. Complex operation 010 with CNC, setup C

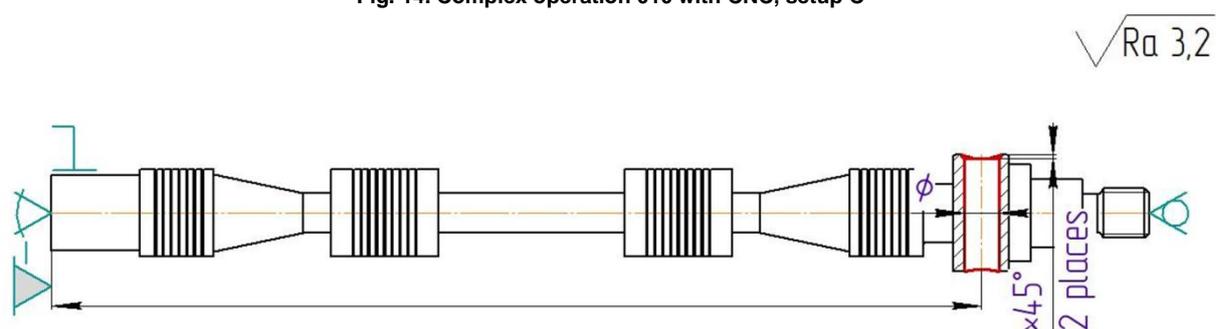


Рис. 15. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ В, позиция 1
Fig. 15. Complex operation 010 with CNC, setup C, position 1

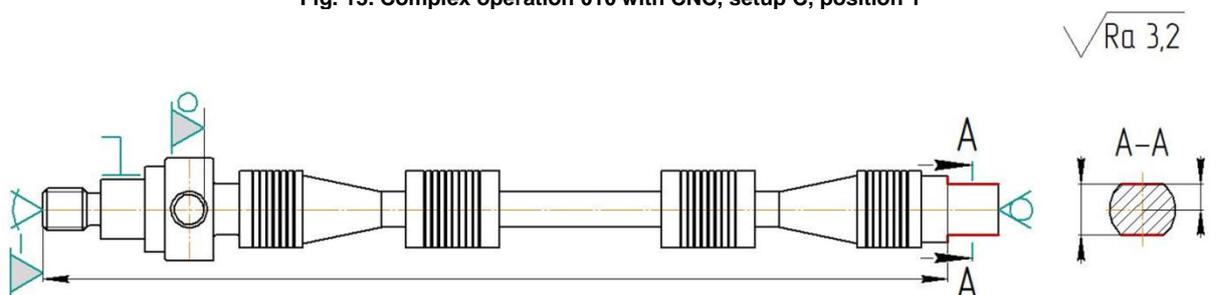


Рис. 16. Операция 010 Комплексная на ОЦ с ЧПУ, установ Г, позиция 2
Fig. 16. Complex operation 010 with CNC, setup D, position 2

По завершении лезвийной обработки предусмотрена операция термической обработки. Применяется поверхностная закалка по технологии обработки током высокой частоты (ТВЧ), которая реализуется с помощью высокочастотной ТВЧ установки на транзисторном IGBT модуле ВЧ-40АВ. Закалке подвергаются исполнительные поверхности золотника. Требуется обеспечить твердость 60...63 HRC.

После термообработки последовательно осуществляются 020 круглошлифовальная (см. рис. 17) и 025 полировальная (см. рис. 18) операции. На круглошлифовальной операции выполняются основные требования точности размеров, формы и взаимного расположения. Производится шлифовка исполнительных цилиндрических поверхностей, торцов, а также чистовая обработка поверхностей, которую необходимо выполнять совместно для удовлетворения технических требований. Необходимо использование шлифовальных кругов, имеющих специальную форму рабочей поверхности для обработки радиусов скруглений галтелей.

Полировальная операция призвана обеспечить шероховатость, которую трудно добиться применением абразивного инструмента. Требуется обеспечить шероховатость Ra 0,4 мкм. При этом обрабатываемые размеры не изменяются, припуск при полировании не удаляется.

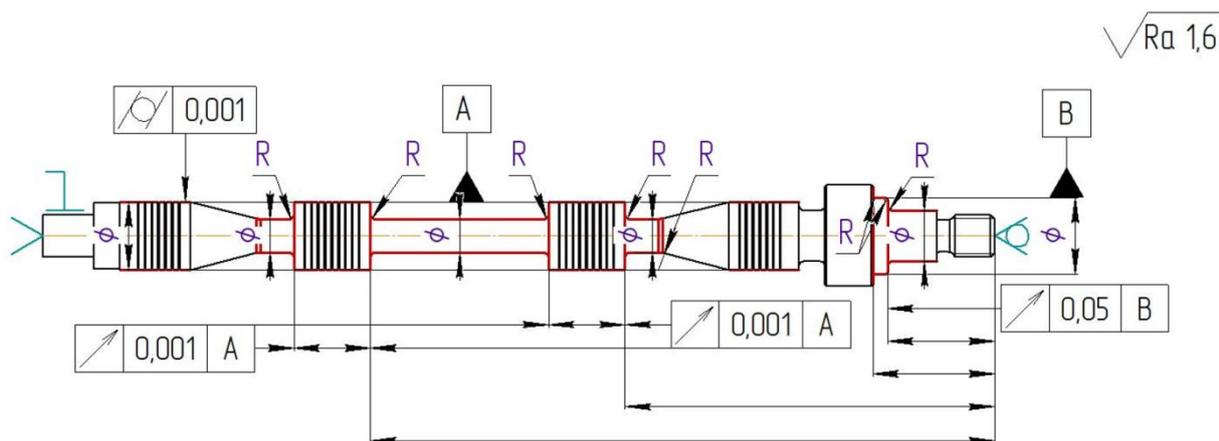


Рис. 17. Операция 020 Круглошлифовальная

Fig. 17. Cylindrical grinding operation 020

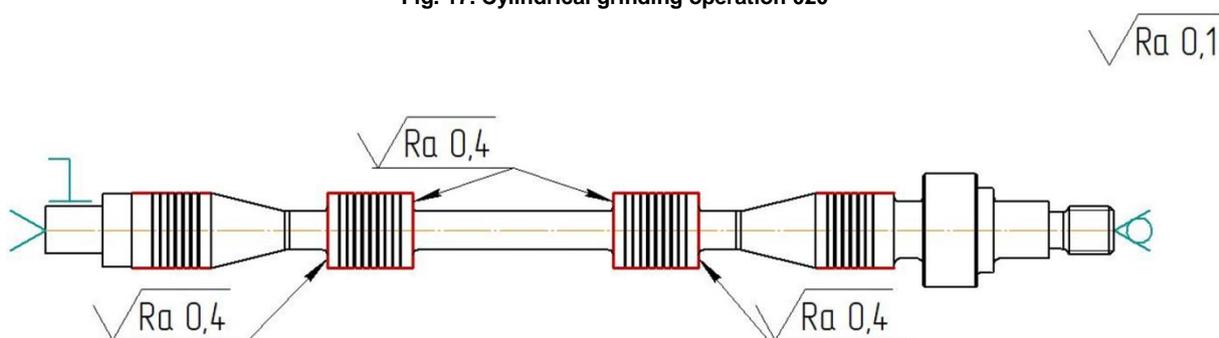


Рис. 18. Операция 025 Полировальная

Fig. 18. Polishing operation 025

2. ОБРАБОТКА ХОЛОДОМ

Завершающая операция по изменению свойств рабочего материала деталей «Гильза» и «Золотник» – криообработка. Оборудованием для выполнения этой операции служит криогенная камера КП-0,04, способная обеспечить указанный в конструкторской документации температурный режим ($-70\dots-80$ °С).

Криогенная обработка нечасто используется в машиностроении, однако существует ряд задач, решение которых с применением данного метода приводит к исключительно полезным результатам. Так, в частности, криогенная обработка используется для управления процессом стружкодробления и повышения общей эффективности лезвийной обработки металлов на станках с ЧПУ [18, 19]; для объемного упрочнения рабочих частей режущего инструмента, к которым предъявляются повышенные требования прочности и износостойкости [20].

Основным материалом комплектующих ВЗП является 95Х18 ГОСТ 5632-72 с содержанием углерода: 0,9–1,0 %, кремния не более 0,8 %, марганца не более 0,8 %, хрома – 17–19 %. Для сталей с содержанием углерода более 0,6 % или легированных инструментальных сталей после закалки сохраняется остаточный аустенит. При закалке в процессе охлаждения превращение аустенита в мартенсит может быть реализовано не полностью. В таком случае если в процессе эксплуатации изделие окажется в условиях для более полного прохождения мартенситного превращения (например, в условиях пониженных температур), это может привести к изменению геометрических параметров изделия. Чтобы избежать подобной ситуации при производстве компонентов ВЗП с высокими требованиями по точности и размерной стабильности (стабильность геометрических параметров), применяется обработка холодом. В результате удается достичь повышения твердости, износостойкости и прочности, а также стабилизировать размеры деталей за счет трансформации остаточного аустенита в мартенсит.

По завершении криообработки проводится тотальный технический контроль деталей (золотника и гильзы) на соответствия всем требованиям чертежа как геометрическим, так и физико-механическим.

3. ИСПЫТАНИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ

Перед началом эксплуатации ВЗП в составе гидропривода применяется обязательная операция по испытанию на функциональность. Цель этого испытания в том, чтобы точно определить расход рабочей жидкости узла гильза – золотник. Для этого применяется специальный стенд гидравлической проливки. Полученные в результате актуальные характеристики ВЗП сравниваются с техническими требованиями ЭГУМ.

В случае если актуальные данные по расходу рабочей жидкости удовлетворяют требованиям, то производится маркировка гильзы и золотника, причем золотник маркируется порядковым номером гильзы. Маркировка комплектующих ВЗП осуществляется электроэрозионным способом с помощью электроискрового маркера. В дальнейшем применяться конкретные гильза и золотник будут строго совместно для обеспечения тех характеристик, которые были получены в ходе испытаний.

Если же в ходе испытаний будет обнаружено, что расход рабочей жидкости не соответствует требованиям, осуществляется доработка золотника. Доработка заключается в том, чтобы удалить припуск с торцов золотника, тем самым отрегулировать расход рабочей жидкости. Величина снимаемого припуска крайне невелика – 0,005...0,006 мм. Осуществляется доработка на шлифовальном станке HOD4-SP, после чего золотник вновь испытывается в составе той же гильзы, что и первоначально.

Заключение

Современные производственно-экономические условия, сложившиеся в России, требуют особого внимания к вопросам технологической независимости. Проектирование и разработка технически сложных и высокоточных машин в свете этого является высокоактуальной задачей.

В настоящей работе изложены результаты технологического сопровождения особо ответственного и высокоточного узла, рассмотрены все этапы изготовления компонентов высокоточной золотниковой пары для их серийного производства с целью полной сборки в составе электрогидравлического усилителя мощности. Выделены технологические аспекты изготовления золотника и втулки, акцентировано внимание на особенностях базирования, механической и термической обработки компонентов золотниковой пары.

Список литературы

1. Столыга И.А., Комарова С.Г. Процедура создания испытательного стенда на предприятии // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. XXXI. № 5. С. 25–27.
2. Giallanza A., Aiello G., Marannano G. Industry 4.0: advanced digital solutions implemented on a close power loop test bench // Procedia Computer Science. 2021. № 180. P. 93–101.
3. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench/ C. Wen, B. Xie, Z. Song, Z. Yang, N. Dong, J. Han, Q. Yang, J. Liu // Biosystems Engineering. 2021. № 205. P. 1–26.
4. Design and modeling of hardware-in-loop test bench for hydraulic excavator based on dynamic load emulation/ J. Chen, D. Huo, C. Liu, H. Zhang, Y. Wang // Automation in Construction. 2022. № 137. P. 1–10.
5. Экспериментальное исследование ресурса цилиндропоршневой группы судовых двигателей внутреннего сгорания при использовании различных смазочных композиций / В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко, Н.В. Прямухина, М.С. Прямухина, О.П. Ковалев // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 3. С. 69–76.
6. Благовещенский Д.И., Козловский В.Н., Васин С.А. Проблема обеспечения надежности новой продукции в автомобилестроении на этапе проектирования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 5. С. 53–59.
7. Design, testing and operation phase improvement taking advantage of data obtained in test benches / I. Bravo-Imaza, T. Eppleb, E. Kondea, E. Gurucetaa // Procedia Manufacturing. 2018. № 16. P. 10–15.
8. Solazzia L., Petrogallia C., Lancinia M. Vibration based diagnostics on rolling contact fatigue test bench // Procedia Engineering. 2011. № 10. P. 3465–3470.

9. Астахов С.А., Бирюков В.И., Боровиков Д.А. Алгоритм моделирования вибрационных воздействий при трековых испытаниях авиационной и ракетной техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24. № 2. С. 291–308.
10. Парпуц А.А., Панкеев Е.С. Вибрационные испытания конструкций летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 714–715.
11. Theoretical and experimental harmonic analysis of cracked blade vibration / G. Shen, F. Gu, Y. Yang, H. Hu, F. Guan // Measurement. 2023. № 222. P. 1–11.
12. On scaled-down bench testing to accelerate the development of novel friction brake materials/ V.R. Singireddy, R. Jogineedi, S.K. Kancharla, K. Farokhzadeh, P. Filip // Tribology International. 2022. № 174. P. 1–12.
13. Bakir M., Ozmen B., Donertas C. Correlation of simulation, test bench and rough road testing in terms of strength and fatigue life of a leaf spring // Procedia Engineering. 2018. № 213. P. 303–312.
14. Laknera T., Bergsa T., Schraknepper D. A novel test bench to investigate the effects of the tool rotation on cutting fluid jets to improve the tool design via additive manufacturing // Procedia CIRP. 2021. № 91. P. 9–14.
15. Dynamic response and failure analysis of bearing under the impact of vibration excitation / N. Li, J. Zhang, X. Meng, Q. Han, J. Zhai // Engineering Failure Analysis. 2023. № 154. P. 1–18.
16. Lifetime assessment of porous journal bearings using joint time-frequency analysis of real-time sensor data / J. Prost, G. Boidi, M. Varga, G. Vorlaufer, S.J. Eder // Tribology International. 2022. № 169. P. 1–9.
17. Mechanics of lumenless pacing lead strength during extraction procedures based on laboratory bench testing / P.J. Vatterott, B. Mondésert, M. Marshall, T. Lulic, B.L. Wilkoff // Heart Rhythm. 2023. Vol 20. № 6. P. 902–909.
18. Горбунов О.И., Максаров В.В., Ольт Ю. Автоматизация и управление процессом стружкодробления обрабатываемого материала аустенитного класса при предварительном криогенном воздействии // Металлообработка. 2009. № 3 (51). С. 48–54.
19. Максаров В.В., Ольт Ю. Динамическая стабилизация процесса резания на основе локальной метастабильности в управляемых робототехнических комплексах на станках с ЧПУ // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 446–451.
20. Морев А.А. Лабораторная установка для криогенной обработки породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 7. С. 367–370.

References

1. Stolyga I.A., Komarova S.G. [Procedure for setting up a test bench at the enterprise]. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2017, vol. 31(5), pp. 25–27. (In Russ.)
2. Giallanzaa A., Aielloa G., Marannanoa G. Industry 4.0: advanced digital solutions implemented on a close power loop test bench. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 180(1), pp. 93–101.
3. Wen C., Xie B., Song Z., Yang Z., Dong N., Han J., Yang Q., Liu J. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench. *Biosystems Engineering*, 2021, vol. 205(1), pp. 1–26.
4. Chen J., Huo D., Liu C., Zhang H., Wang Y. Design and modeling of hardware-in-loop test bench for hydraulic excavator based on dynamic load emulation. *Automation in Construction*, 2022, vol. 137(1), pp. 1–10.
5. Chanchikov V.A., Guzhvenko I.N., Pryamukhina N.V., Pryamukhina M.S., Kovalev O.P. [Experimental study of cylinder piston group life of marine internal combustion engines using different lubricant compositions]. *Bulletin of ASTU. Series: Marine Engineering and Technology*, 2022, vol. 3, pp. 69–76. (In Russ.)
6. Blagoveshchenskii D.I., Kozlovskii V.N., Vasin S.A. [The problem of ensuring the reliability of new products in the automotive industry at the design stag]. *Proceedings of TulGU. Technical Sciences*, 2022, vol. 5, pp. 53–59. (In Russ.)
7. Bravo-Imaza I., Eppleb T., Kondea E., Gurucetaa E. Design, testing and operation phase improvement taking advantage of data obtained in test benches. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 16(1), pp. 10–15.

8. Solazzia L., Petrogallia C., Lancinia M. Vibration based diagnostics on rolling contact fatigue test bench. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 10, pp. 3465–3470.
9. Astakhov S.A., Biryukov V.I., Borovikov D.A. [Algorithm for modeling vibration effects during track testing of aviation and rocket equipment]. *Siberian Aerospace Journal*, 2023, vol. 24(2), pp. 291–308. (In Russ.)
10. Parputs A.A., Pankeev E.S. [Vibration testing of aircraft structures]. *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2015, vol. 1, pp. 714–715. (In Russ.)
11. Shen G., Gu F., Yang Y., Hu H., Guan F. Theoretical and experimental harmonic analysis of cracked blade vibration. *Measurement*, 2023, vol. 222, pp. 1–11.
12. Singireddy V.R., Jogineedi R., Kancharla S.K., Farokhzadeh K., Filip P. On scaled-down bench testing to accelerate the development of novel friction brake materials. *Tribology International*, 2022, vol. 174, pp. 1–12.
13. Bakir M., Ozmen B., Donertas C. Correlation of simulation, test bench and rough road testing in terms of strength and fatigue life of a leaf spring. *Procedia Engineering*, 2018, vol. 213, pp. 303–312.
14. Laknera T., Bergsa T., Schraknepper D. A novel test bench to investigate the effects of the tool rotation on cutting fluid jets to improve the tool design via additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 91, pp. 9–14.
15. Li N., Zhang J., Meng X., Han Q., Zhai J. Dynamic response and failure analysis of bearing under the impact of vibration excitation. *Engineering Failure Analysis*, 2023, vol. 154, pp. 1–18.
16. Prost J., Boidi G., Varga M., Vorlaufer G., Eder S.J. Lifetime assessment of porous journal bearings using joint time-frequency analysis of real-time sensor data. *Tribology International*, 2022, vol. 169, pp. 1–9.
17. Vatterott P.J., Mondésert B., Marshall M., Lulic T., Wilkoff B.L. Mechanics of lumenless pacing lead strength during extraction procedures based on laboratory bench testing. *Heart Rhythm*, 2023, vol. 20(6), pp. 902–909.
18. Gorbunov O.I., Maksarov V.V., Ol't Yu. [Automation and control of chip breaking process of austenitic class machined material under pre-cryogenic influence]. *Metalworking*, 2009, vol. 3(51), pp. 48–54. (In Russ.)
19. Maksarov V.V., Ol't Yu. [Dynamic stabilization of cutting process on the basis of local metastability in controlled robotic complexes on CNC machines]. *Notes of the Mining Institute*, 2017, vol. 226, pp. 446–451. (In Russ.)
20. Morev A.A. [Laboratory unit for cryogenic treatment of rock-destroying tools]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, vol. 7, pp. 367–370. (In Russ.)

Информация об авторах

Ардашев Дмитрий Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ardashevdv@susu.ru

Жуков Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zhukovas@susu.ru

Information about the authors

Dmitrii V. Ardashev, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department “Automation Engineering”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ardashevdv@susu.ru

Aleksandr S. Zhukov, assistant of department “Automation Engineering”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; zhukovas@susu.ru

Статья поступила в редакцию 23.08.2024; принята к публикации 26.08.2024.

The article was submitted 23.08.2024; accepted for publication 26.08.2024.