

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.27-34.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 27-34.

Научная статья
УДК УДК 621.9.047/621.9.048
doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-34

Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники

Владислав Павлович Смоленцев¹, Д.Т.Н.
Михаил Вячеславович Кондратьев², К.Т.Н.
Евгений Владиславович Смоленцев³, Д.Т.Н.
^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
¹ vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0327-0354>
² 540520@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>
³ smolentsev.rabota@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8747-588X

Аннотация. В работе рассмотрена крупная научная и прикладная проблема повышения качества, и надежности наукоемких изделий технологическими методами и средствами, что составляет основу для производства конкурентоспособной продукции отечественного машиностроения в первую очередь в авиакосмической отрасли. Проведен анализ причин появления дефектов техники и снижения ее надежности по стадиям жизненного цикла изделий. Были определены мероприятия, обеспечивающие заданную надежность при сохранении или повышении ресурса с минимизацией затрат на стадии запуска изделий в серийное производство путем поэтапного повышения эксплуатационных характеристик в процессе испытаний продукции. Показано, что комбинированные методы обработки деталей позволяют создавать малогабаритные многослойные вибростойкие фильтры с увеличенной площадью рабочей зоны и суммарной толщиной стенки, обеспечивающей устойчивость изделия к многократным колебаниям, что ранее приводило к необходимости нежелательного увеличения габаритов и массы производимого изделия. Раскрыты возможности использования комбинированных методов обработки с наложением электромагнитных полей для улучшения эксплуатационных характеристик модернизированных и создаваемых деталей летательных аппаратов, в том числе их элементов, при освоении серийного производства наукоемких изделий, особенно разрабатываемых для их импортозамещения. Изучено изменение механических характеристик материалов при различных методах обработки. Испытания образцов на предел прочности и удлинение показали, что последовательное использование высокоэффективной электрохимической размерной обработки с последующим виброударным (или иным) упрочнением позволяет повысить характеристики изделий до 10 % и достичь результата, не ниже полученного после механической обработки с упрочнением.

Ключевые слова: ресурс, надежность, технологичность, комбинированные методы обработки, двигатели

Для цитирования: Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В. Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 27–34. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-34

Combined technologies for increasing the reliability and service life of aerospace products

Vladislav P. Smolentsev¹, D. Eng.
Mikhail V. Kondratiev², PhD. Eng.
Evgeny V. Smolentsev³, D. Eng.
^{1, 2, 3} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
¹ vsmolen@inbox.ru
² 540520@mail.ru
³ smolentsev.rabota@gmail.com

Abstract. The paper considers a major scientific and applied problem of improving the quality and reliability of scientific products by technological methods and means, forming the basis for the production of competitive products of domestic engineering, primarily in the aerospace industry. The analysis of the defect appearance causes in technology and the decrease in its reliability at the stages of product life cycle is carried out. Measures were identified to ensure established reliability while

maintaining or increasing the resource with minimizing costs at the stage of commercializing by gradually increasing operational characteristics under way product test. It is shown that combined methods of part process allow creating small-sized multilayer vibration-resistant filters with an increased area of the working area and a total wall thickness that ensures the stability of the product to repeated vibrations, which previously caused undesirable increase in the dimensions and mass of a manufactured product. The possibilities of using combined processing methods with the imposition of electromagnetic fields to improve the operational characteristics of upgraded and aircraft parts under formation, including their elements, in the expansion of mass production of scientific products, particularly developed for their import substitution, are found. The change in the mechanical characteristics of materials under various processing methods has been studied. Specimens test for strength at failure and stretch have shown that the consistent use of highly efficient electrochemical sizing followed by jackhammering (or other) way of hardening allows the increase in the characteristics of products up to 10%, achieving a result not lower than that obtained after tooling with hardening.

Keywords: resource, reliability, manufacturability, combined tooling techniques, engines

For citation: Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Smolentsev E.V. Combined technologies for increasing the reliability and service life of aerospace products / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 27–34. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-34

Введение

К изделиям авиакосмического машиностроения относятся летательные аппараты, где объективно существуют повышенные требования к уровню надежности изделий. Одним из основных элементов таких изделий, определяющий длительность их безотказной работы, является надежность двигателя, характеризующая межремонтный цикл эксплуатации современных самолетов оборонного и гражданского назначения [1]. После освоения выпуска ракетных двигателей новых поколений, обеспечивающих многоразовые пуски, повысились требования к их надежности и долговечности при минимальной доработке аппаратов, возвратившихся из космоса [2]. Опыт разработки новых способов и устройств [3] изготовления ответственных деталей с использованием комбинированных методов обработки [4 – 6] показал, что расширение области использования таких процессов способно существенно улучшить характеристики летательных аппаратов, их двигателей и позволяет достичь эксплуатационных показателей, превышающих достигнутый уровень не только отечественных, но и зарубежных изделий авиакосмической техники.

Основные причины, снижающие надежность двигателей летательных аппаратов

В процессе отработки технологичности двигателей установлено, что в области качества и надежности изделий в отечественном машиностроении имеется весомый задел основополагающих конструкторских и технологических решений, который достаточен для построения эффективной системы управления качеством наукоемких изделий,

соответствующей уровню качества создаваемой и выпускаемой продукции отечественных и зарубежных фирм.

На стадии запуска изделий в серийное производство путем поэтапного повышения эксплуатационных характеристик в процессе испытаний продукции были определены мероприятия, обеспечивающие заданную надежность при сохранении или повышении ресурса с минимизацией затрат на эти цели.

Общий подход к оценке качества техники возможен за счет единых критериев, определяемых границами нормативных документов, и при сертификации продукции.

Анализ причин появления дефектов техники и снижения ее надежности позволили выявить объекты исследований по стадиям жизненного цикла изделий (рис. 1).

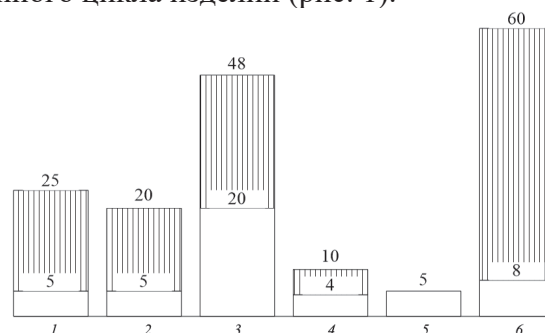


Рис. 1. Анализ причин, снижающих надежность двигателей летательных аппаратов:

1 – дефекты материалов, заготовок; 2 – механообработка; 3 – сварка и пайка; 4 – сборка и испытание; 5 – хранение и транспортировка; 6 – прочие причины (эксплуатация, качество приборов, комплектующих, случайные факторы и др.)

Fig. 1. Analysis of the causes that reduce the reliability in aircraft engines:

1 – defects in materials, blanks; 2 – machining operation; 3 – welding and brazing; 4 – assembly and testing; 5 – storage and transportation; 6 – other causes (operation, quality of devices, components, random factors, etc.)

Рис. 1 показывает, что появление брака первой группы деталей определяется причинами, слабо зависящими от изготовителя наукоемких изделий, например, двигателей авиакосмической техники. Это получаемые со стороны материалы, готовые профили, в том числе от поставщиков из-за рубежа. Здесь для контроля качества материалов обычно вводят входной выборочный контроль, что повышает затраты на их приобретение до 0,4...0,5 % от стоимости и снижает оценки технологичности.

Если имеется выбор, то для снижения брака производят смену поставщика, что практически используется крайне редко. Качество заготовок (рис. 1), как правило, определяется состоянием технической базы собственных заготовительных производств и оценивается их технологическими возможностями, соблюдением производственной дисциплины. Так при стальном литье брак заготовок с простой геометрией и небольшими размерами практически не проявляется, но в случае сложных изделий (лопаток, облопаченных роторов, статоров, корпусных деталей), свойственных авиакосмическому машиностроению, он может достигать 30...40 % (даже при использовании точных видов литья).

При механообработке, включая комбинированные методы обработки, значимые дефекты проявляются за счет нарушения точности, зависящей главным образом от состояния станочного парка, средств технологического оснащения, квалификации исполнителей, соблюдения технологической дисциплины. Их устранение возможно путем использования новых технологических приемов, создаваемых комбинацией различных воздействий на объект изготовления. Так, для обработки поверхностей сложной формы, особенно в деталях из труднообрабатываемых материалов, широко применяют электрические методы и их комбинации с механической обработкой.

Изучено изменение механических характеристик материалов при различных методах обработки. Испытания образцов на предел прочности и удлинение показали, что последовательное использование высокоэффективной электрохимической размерной обработки с последующим виброударным (или иным) упрочнением [1, 2] позволяет повысить характеристики изделий до 10 % и достичь результата, не ниже полученного после механической обработки с упрочнением.

Анализ других значимых факторов, приведенных на рис. 1, рассмотрен в [4 – 6].

Основные направления технологических исследований по повышению качества и надежности двигателей летательных аппаратов

В работе [1] обобщены исследования в различных отраслях машиностроения [7] и предложено в качестве приоритетных использовать следующие направления технологических изысканий по повышению эксплуатационных показателей деталей для газотурбинных двигателей (ГТД):

– применение новых видов материалов и покрытий, отвечающих условиям работы в изделии, технико-экономическим требованиям и уровню показателей, достигнутых на мировом уровне. Применительно к ГТД свойства наносимых покрытий могут повысить эксплуатационные показатели по надежности до желательной величины без ухудшения весовых и стоимостных характеристик изделия. Количественно это может быть оценено с помощью критериев производственной технологичности, приведенных в [2], а научную новизну и приоритет необходимо закрепить открытиями и патентами. В результате необходимо достичь получения высоких эксплуатационных характеристик изделий из дорогостоящих и дефицитных материалов при минимальном их использовании в качестве покрытий. На этом этапе отработки производственной технологичности основной задачей технологов является создание новых способов и средств технологического обеспечения, эффективных для обработки новых материалов, покрытий и их сочетаний при минимальных затратах в производстве;

– создание методов и средств для контроля качества на всех этапах изготовления, сборки и опытной эксплуатации ответственных деталей, сборочных комплектов и готовых изделий. Здесь выполняется поэтапное совершенствование создаваемых и модернизируемых объектов с использованием, в основном, технологических приемов опытного производства, единых для различных отраслей машиностроения [7];

– целенаправленные исследования по комбинированным методам обработки применяемых и создаваемых материалов для объектов различной геометрической формы и сложности, предлагаемых для использования в перспективных изделиях. Специфичными здесь являются сложнопрофильные детали типа лопаток и другие детали горячей зоны реактивных двигателей, где требуется решить вопросы по обеспечению требуемых свойств

поверхностного слоя деталей [1] при соблюдении показателей производственной технологичности [2, 5]. В современных условиях необходимо направить усилия на создание ответственных, защищенных охранными документами, технологических методов и средств [4, 8, 9], расширяющих возможности разработчиков по созданию конкурентоспособных ГТД [1].

Создание изделий ракетной техники [2] протекало с наибольшим использованием достижений технологической науки в области авиационных двигателей. Особенностью применения накопленных результатов для ракетных двигателей (в частности, жидкостных (ЖРД)) ранее являлось их одноразовое применение при рабочих пусках. В настоящее время ЖРД начали успешно применять для многократных рабочих пусков, что потребовало обеспечения повышенных требований по надежности и долговечности двигателей в случае их повторного применения для последующих пусков ракет.

В настоящее время конструктивные и технологические мероприятия должны обеспечивать их безаварийное использование не менее 20 – 25 раз, а на ближайшую перспективу поставлена задача достичь 50 пусков. Это возможно при использовании для горячей зоны двигателей термостойких защитных покрытий, наносимых преимущественно, лучевыми методами, например приведенными в [3]. Здесь решена задача повышения качества поверхностного слоя деталей при их многократной и длительной эксплуатации.

Аналогичные явления наблюдаются на переходных участках с покрытием внутри камеры сгорания, где поток горючей смеси меняет направление течения и встречает торможение, для снижения которого требуется местная локальная зачистка поверхности. Камеры сгорания могут иметь различные, в том числе малые, сечения, что затрудняет подвод профильного инструмента в зону обработки и выполнение технологических перемещений для управляемого удаления припуска.

С целью эффективного выполнения операции чистовой обработки покрытия потребовались нетрадиционные технологические процессы, одним из которых стала комбинированная электроабразивная обработка кругом и гибким нежестким инструментом с наложением электрического поля. В этом случае процесс происходит при минимальных силах резания и износе электрода с локальным перемещением инструмента, требуемым для выноса продуктов обработки, что расширяет технологические возможности изготовления качественных

деталей для изделий авиакосмической отрасли, имеющих, как правило, уменьшенную массу и габариты.

Исследования в области аддитивных процессов открыли возможность изготовления в инструменте для электроабразивной обработки каналов с профилем, обеспечивающих регулируемую подачу через корпус инструмента жидкой и газожидкостной рабочей среды со стабильным расходом для подачи ее в труднодоступные участки чистовой обработки, что существенно снизило износ инструмента и открыло возможность одновременного формообразования нескольких поверхностей (в том числе внутренних) у деталей повышенной точности и ресурса. Такие инструменты имеют достаточно высокую стойкость, оцениваемую при отработке производственной технологичности. Это является одним из перспективных направлений интенсификации производства и снижения затрат до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность выпускаемой и перспективной отечественной продукции на мировом рынке машиностроения. Для реализации комбинированного электроабразивного метода для чистовой обработки [4, 8, 9] труднодоступных элементов деталей потребовалась разработка новых (на уровне изобретений) инструментов, наиболее полно использующих достижения в области электроабразивного процесса, что актуально для машиностроения.

При чистовой обработке длинных каналов (общая длина пазов камер сгорания современных ракетных двигателей может превышать 500 м) с пазами типа приведенных на рис. 2, желательно выбирать меньшие значения продольной подачи инструмента, ориентируясь на участки с выступающими ребрами малой (от 0,8 мм) ширины и углублениями таких же величин, создающих каналы для протекания охлаждающих сред (в основном топлива в жидком и газожидкостном состоянии).

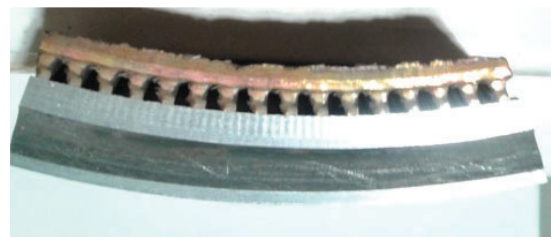


Рис. 2. Профиль корпуса ЖРД с пазами для прохождения охлаждающей жидкости

Fig. 2. The profile of the LRE body with slots for the coolant transit

При этом средняя скорость подачи инструмента может стать меньше требуемой для осуществления качественной чистовой обработки и без применения комбинированных процессов обработки существенно снизится производительность процесса. Для реализации потенциальных возможностей комбинированной обработки целесообразно использовать электроабразивный инструмент с переменным профилем проточного тракта для регулируемой подачи рабочей среды, получаемый аддитивными технологиями с возможностью использования адаптивного управления режимами обработки.

При создании ракетных двигателей с большой тягой (в частности, водородно-кислородных) потребовалось интенсифицировать охлаждение камер сгорания и реактивного сопла. Для этого начали создаваться новые системы охлаждения, в основном жидким водородом, прокачиваемым по продольным каналам через фрезерованные узкие пазы на наружной поверхности камеры сгорания и реактивного сопла. Здесь охлаждающий компонент переходит в газожидкостную смесь и возникает возможность перекрытия охлаждающего канала газовой составляющей среды. Типовая система охлаждения горячей зоны ЖРД приведена на рис. 3.

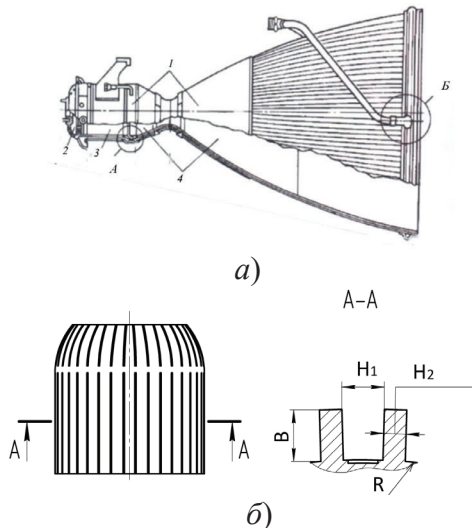


Рис. 3. Горячая зона ЖРД:
a – общий вид: 1 – корпус; 2 – смесительная головка (огневой диск); 3 – камера сгорания; 4 – реактивное сопло; А – пояс завесы, Б – подвод охладителя;
б – типовое сечение охлаждающего канала камеры сгорания: H_1 – ширина канала; H_2 – толщина ребра между боковыми стенками паза; B – глубина канала; R – радиус паза в детали

Fig. 3. The hot area of the LRE:
a – general view: 1 – the body; 2 – the mixing chamber (fire disk); 3 – the combustion chamber; 4 – jet nozzle; A – curtain belt, B – cooler supply;
b – a typical cross-section of the cooling channel of the combustion chamber: H_1 – the width of the channel; H_2 – the thickness of the rib between the side walls of the groove; B – the depth of the channel; R – the radius of the groove in the part

На рис. 3, *a* приведен общий вид горячей зоны ракетного двигателя, включающий размещенную в корпусе 1 камеру сгорания 3 и реактивное сопло 4. Топливо перед сгоранием поступает через патрубок (рис. 3, *б*) по каналам на поверхности реактивного сопла 4 и камеры сгорания 3 к смесительной головке 2 с поясом завесы, оказывающей эффективное локальное охлаждение зоны горения, но весьма трудоемкой при изготовлении и снижающей прочностные характеристики деталей. Консольное крепление корпуса 1 вызывает вибрацию системы, что может положительно сказываться на течении охладителя по каналам. На ряде ЖРД каналы имеют прямоугольную форму в виде узкого паза (см. рис. 3, *б*). В применяемых изделиях геометрия охлаждающих каналов имеет широкие диапазоны (см. рис. 3, *б*) по ширине H_1 – толщине ребер между боковыми стенками паза H_2 ; глубине B от долей до нескольких миллиметров, что усложняет доступ металлообрабатывающего инструмента в зону формообразования пазов, особенно внутри изделия, и проявляет преимущества применения комбинированных методов обработки.

На рис. 3, *б* приведено типовое сечение охлаждающего канала камеры сгорания, где требуется выполнить чистовую обработку каналов с пазами шириной H_1 , снизить шероховатость поверхности и удалить местные неровности типа показанного на рис. 2.

С использованием комбинированных методов обработки по гибким фотошаблонам на донной и боковых частях внутри каналов удалось изготовить профильные локальные углубления, позволяющие повысить площадь охлаждающей поверхности и за счет переменного профиля углубления обеспечить отрыв потока от стенки канала до его перекрытия газом и нарушения стабильности охлаждения горячей зоны изделия.

Рассматриваемые в работе и другие мероприятия, выполненные для повышения ресурса ракетных двигателей, позволили значительно повысить допустимое количество пусков изделий (рис. 4.). Эта проблема стала еще более актуальной при переходе на космические летательные аппараты многоразового использования. В перспективе планируется получить за счет выполнения рассматриваемых в работе и других конструкторских и технологических мероприятий повышение ресурса, обеспечивающего количество пусков до 50 и более, что требуется для многократного эффективного использования перспективных ракетных систем.

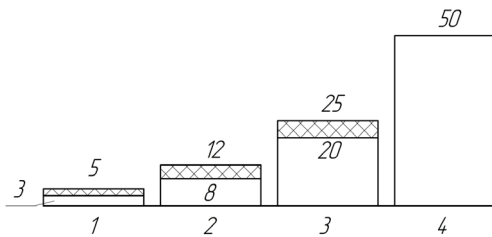


Рис. 4. Динамика увеличения ресурса горячей зоны ракетного двигателя по количеству непрерывных безаварийных пусков:

1 – период создания и освоения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД); 2 – период начала эффективного использования ЖРД для освоения космического пространства; 3 – состояние на текущий период; 4 – количество пусков при использовании ЖРД в системах многократного применения

Fig. 4. Dynamics of increasing the resource of the rocket engine hot area by the number of a continuous mishap-free motor starting:

1 – the period of production and development of liquid rocket engines (LRE); 2 – the period of the beginning of the effective use of LRE for space exploration; 3 – the state for the current period; 4 – the number of the engine starting at the use of LRE in recoverable systems

Комбинированные методы обработки позволили создать малогабаритные многослойные вибростойкие фильтры с увеличенной площадью рабочей зоны и суммарной толщиной стенки, обеспечивающей устойчивость изделия к многократным колебаниям, что ранее приводило к необходимости нежелательного увеличения габаритов и массы изделия. В летательных аппаратах фильтры работают при значительных динамических и тепловых нагрузках и для достижения требуемых прочностных характеристик изготавливаются преимущественно из труднообрабатываемых металлических материалов, где толщина листа характеризует не только механическую прочность, но и производственную технологичность, устойчивость фильтра к вибрационным нагрузкам, фильтрующую способность изделия.

В двигателях летательных аппаратов одним из основных параметров оценки уровня технологичности является минимальная масса деталей и сборочных единиц изделия. Для фильтров, кроме того, требуется обеспечить максимальную фильтрующую способность, оцениваемую соотношением площади сечения каналов к общей площади, занимаемой проточной частью.

При изготовлении элементов конструкции, устанавливаемых в топливные магистрали летательных аппаратов, должны быть обеспечены высокие требования к точности и качеству поверхностного слоя каналов, что требует разработки и применения нетрадиционных методов получения отверстий с различным сечением каналов и кривизной оси, обеспечивающей безударный вход и выход из фильтра очищаемой

среды. Для этого реализован механизм формирования сопрягаемых отверстий различного сечения с переменной геометрией оси в слоях и разработаны пути повышения характеристик многослойных фильтров, используемых в изделиях авиакосмической отрасли.

В частности, предложен новый процесс формирования винтовых каналов в многослойных конструкциях, установлены технологические связи между воздействиями для различных схем прошивки отверстий различного профиля и положения вектора течения струи, что позволило обосновать назначение обоснованной толщины слоев многослойных фильтров, изготавливаемых лучевой, комбинированной прошивкой, в том числе по фотошаблонам, в металлических тонкостенных листовых материалах, используемых в настоящее время для изготовления фильтрующих элементов.

На примере многослойного фильтра (рис. 5) с многогранными каналами сечением 0,2 мм показана возможность снизить длину и массу перспективных изделий. При этом следует учитывать, что расчетные результаты носят оценочный характер, но хорошо подтверждаются экспериментально, пригодны для ускоренного обоснования варианта обработки каналов по фотошаблонам и могут использоваться при отработке технологичности.

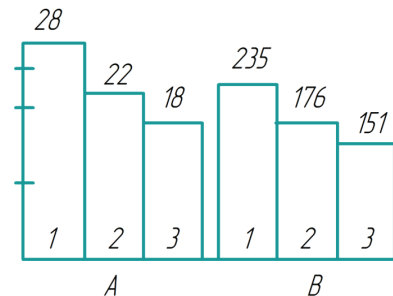


Рис. 5. Снижение длины (A, мм) и массы (B, г) фильтров с толщиной стенки до 1,0 мм при различных конструкциях и методах изготовления (прошивка круглых отверстий электронно-лучевым методом для 1, 2; комбинированные методы прошивки каналов по фотошаблонам для 3):

1 – цельный; 2 – многослойный из листа толщиной 0,2 мм; 3 – многослойный из листа толщиной 0,2 мм, полученный многоэлектродной прошивкой квадратных отверстий

Fig. 5. Reduction of the length (A, mm) and mass (B, d) of filters with a wall thickness of up to 1,0 mm with different designs and manufacturing methods (piercing round holes by electron beam method for 1, 2; combined methods of flashing channels by photomasks for 3):

1 – integral; 2 – multilayer of a sheet 0,2 mm thick; 3 – multilayer of a sheet 0,2 mm thick, obtained by multielectrode stitching of square holes

Многослойные металлические фильтры обладают весомыми достоинствами перед цельными. Длина изделия только за счет снижения величины перемычки может быть снижена до 22 % и более, а масса – не менее чем на 26 %.

Применение комбинированных методов обработки позволяет снизить длину и массу фильтров более чем на 36 % при сохранении фильтрующей способности, качества и надежности.

Применительно к многослойным фильтрам основным критерием варианта технологии их изготовления является выбор толщины слоев различных материалов, используемых в отрасли для исследуемых изделий.

Механизм управления качеством изделий на этапе их изготовления

При проектировании новых изделий разработчик выбирает по документации поставляемую продукцию, оценивает ее влияние на показатели качества изделия, изучает опыт изготовления и эксплуатации изделий, аналогичных создаваемому, формирует конечные показатели качества, которые должны соответствовать требованиям технического задания, согласованного с заказчиком, и общему уровню системы, для которой изготавливается изделие.

Изготовитель заинтересован в получении продукции высокого качества, но ограничен материальными средствами на такие исследования. На стадии запуска изделий в серийное производство требуется не просто поддерживать показатели качества и обеспечивать надежность объектов, но и систематически проводить научные, прикладные работы по совершенствованию технологии, а, совместно с разработчиком, – по улучшению конструкции с учетом новых технологических достижений в мире в той их части, которая реализована (или может быть применена) в производстве.

На качество изделий влияют многие факторы, зависящие от разработчика (конструкция), поставщиков (качество поставляемой продукции), эксплуатационников (соблюдение условий функционирования в изделии). Однако реализация комплекса воздействий в виде качественного изделия в основном зависит от изготовителя на всех стадиях изготовления (включая контроль и испытания).

Для улучшения показателей качества на стадии производства продукции необходимо из множества ограничений технологического, финансового, организационного вида

выделить те, которые способствуют росту общего показателя качества изделий. Это может быть высокая деловая репутация изготовителя за прошлый период, удобное географическое расположение (упрощается упаковка готового изделия, снижаются транспортные расходы и др.), современное технологическое оснащение производства, кадры требуемого уровня, эффективная структура управления, привлекательная финансовая и социальная политика.

Для управления качеством наукоемких изделий на стадии их производства требуется учет всего жизненного цикла объектов и взаимодействий с другими технологическими показателями в форме численных оценочных показателей [10].

Экономические, организационные связи, требования разработчика, потребителя продукции можно использовать в математической модели управления качеством в виде ограничений, корректируемых по мере изменения финансовой, экономической обстановки, структурных и организационных преобразований, а в ряде случаев – потребностей страны и политической обстановки.

Заключение

В работе рассмотрена крупная научная и прикладная проблема повышения качества, и надежности наукоемких изделий технологическими методами и средствами, что составляет основу для производства конкурентоспособной продукции отечественного машиностроения в первую очередь в авиакосмической отрасли. Такие вопросы входят в национальные программы повышения качества промышленной продукции страны.

Ожидаемые результаты от использования материалов работы:

– рост престижа предприятий, что реализуется в производстве востребованных наукоемких изделий и приоритетах при получении выгодных заказов в стране и за рубежом;

– научно обоснованные достигнутые и перспективные показатели качества авиакосмической отрасли, которые позволяют стимулировать развитие продукции машиностроения, повысить ресурс и обеспечить надежность изделий при эксплуатации в авиакосмическом машиностроении оборонного и гражданского профиля при наибольшем использовании импортозамещения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мухин В.С. Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД // М: Наука, 2005. 296 с.
2. Бондарь А.В. Качество и надежность. М: Машиностроение. 2007. 308 с
3. Патент 2619410 РФ. Способ плазменного напыления покрытия / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.В. Сафонов, М.В. Кондратьев, Е.С. Бобров // Заявлен 20.01.2015. Оpub. 15.05.2017. Бюл. № 14
4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. // М: Машиностроение. 2005. 511 с.
5. Патент 2405662 (РФ). Способ нанесения чугуного покрытия на алюминиевые сплавы / В.П. Смоленцев, А.В. Гребенщиков, А.В. Перова, Б.И. Омигов // Бюл. изобр. 2010 № 34.
6. Перова А.В., Смоленцев В.П., Грибанов А.С. Формирование покрытий на алюминиевых сплавах методом электроэрозионного легирования // Авиакосмические технологии «АКТ - 2008», Труды IX Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов, Воронеж: ВГТУ, 2008. С. 48–53.
7. Контроль и управление качеством продукции в гибкоструктурном производстве / Н.М. Бородкин, В.И. Клейменов, А.С. Белякин, В.П. Смоленцев // Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 138 с.
8. Научноёмкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина // М: Инновационное машиностроение. 2018. 818 с.
10. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5–9.

REFERENCES

1. Mukhin V.S. Surface: technological aspects of the strength of GTE parts // Moscow: Nauka, 2005, 296 p.
2. Bondar A.V. Quality and reliability. Moscow: Mashinostroenie, 2007,308 p.
3. Patent 2619410 of the Russian Federation. The method of plasma coating spraying / V.P. Smolentsev, E.V. Smolentsev, S.V. Safonov, M.V. Kondratiev, E.S. Bobrov // Applied 20.01.2015. Publ. 15.05.2017. Bul. No. 14.
4. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined tooling techniques. / Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
5. Patent 2405662 (RF). Method of applying cast iron coating on aluminum alloys / V.P. Smolentsev, A.V. Grebenschikov, A.V. Petrova, B.I. Omigov // Bul. invention, 2010, no. 34.
6. Perova A.V., Smolentsev V.P., Griбанov A.S. Formation of coatings on aluminum alloys by the method of electroerosive alloying // Aerospace technologies «AST – 2008», Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical conf. and schools of young scientists, postgraduates and students, Voronezh: VSTU, 2008, pp. 48–53.
7. Product quality control and inspection in flexible structural production / N.M. Borodkin, V.I. Kleimenov, A.S. Belkin, V.P. Smolentsev // Voronezh: VSU Publishing House, 2001, 138 p.
8. Science intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez'yazichny et al.; edited by A.G. Suslov. Moscow. Mashinostroenie. 2012, 528 p.
9. Directory of a machine-building technologist. In 2 vols, vol.2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin // Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 818 p.
10. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Status and development prospects of combined processing methods // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov, 2017, no. 2 (41), pp. 5–9.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.05.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023; принята к публикации 27.05.2023.

The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 25.05.2023; assepted for publication 27.05.2023.