

УДК 621.452.3.002:621.941.01

Долматов А. И. д.т.н., проф., Курин М. А. к.т.н., доц., Воронько В. В. д.т.н., доц., Скорченко И. В.
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТОЧЕНИЯ ДИСКОВ И ВАЛОВ ГТД ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Dolmatov A., Kurin M., Voron'ko V., Skorchenko I.

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine (ira.skorchenko@mail.ru)

THE METHODS OF THE INTENSIFICATION OF THE GTE DISCS AND SHAFTS HARD MATERIALS TURNING

Сформулирована проблема повышения эффективности производства дисков и валов ГТД за счет интенсификации точения. Рассмотрены перспективы использования материалов в авиастроении. Дана оценка объема применения токарных операций в механообработке дисков и валов ГТД. Предложена феноменологическая модель интенсификации процесса точения труднообрабатываемых материалов. Кратко рассмотрены основные методы совершенствования процесса резания. Выполнен обзор прогрессивных комбинированных методов обработки резанием труднообрабатываемых материалов. Сделан вывод об актуальности исследования метода непосредственного управления контактными и тепловыми явлениями для интенсификации токарной обработки труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: технологический процесс; эффективность; интенсификация; точение; обрабатываемость; комбинированные методы; вал; диск

Введение

В настоящее время состояние интеллектуальных и высокотехнологических отраслей экономики Украины является проблемным, а согласно оценкам некоторых экспертов – кризисным [1]. В современных условиях жесткой конкуренции на мировом рынке предприятия авиационной промышленности Украины требуют максимально активной научно-исследовательской деятельности в целях достижения устойчивой конкурентоспособности выпускаемой продукции как решающего фактора коммерческого успеха. Обеспечение конкурентоспособности в авиадвигателестроении, реализуемое в двух ключевых направлениях – повышении качества и одновременном применении ресурсосберегающих технологий, требует широкого использования коррозионно-стойких, высоко- и жаропрочных металлов и сплавов, с одной стороны, и совершенствования технологии – с другой. Большой объем механических операций в технологических процессах и низкая обрабатываемость используемых в авиадвигателестроении материалов, предопределяют необходимость повышения эффективности размерной обработки посредством интенсификации применяемых методов обработки.

1. Постановка проблемы

В структуре общей трудоемкости формообразования таких ответственных деталей ГТД как валы и диски, наибольший удельный вес занимает механообработка [2]. Трудоемкость механической обработки составляет 50...60% и более от общей трудоемкости изготовления современного авиационного двигателя [3], что ставит первоочередную задачу интенсификации обработки резанием ТОМ. В работе [4] показано, что из всего многообразия методов интенсификации обработки резанием труднообрабатываемых материалов перспективными являются комбинированные, которые обеспечивают наиболее полное протекание адсорбционного взаимодействия компонентов СОТС с ювенильными участками обрабатываемой поверхности.

2. Анализ технологических процессов изготовления дисков и валов ГТД

Повышение летно-технических характеристик современных самолетов, высокий уровень нагрузок конструкций в значительном диапазоне знакопеременных напряжений требуют разработки и использования высокоэффективных конструкционных материалов, в большинстве своем являющихся труднообрабатываемыми. Тенденция развития использования материалов в авиастроении за двадцатилетие выражена статистическими данными, представленными в работе [5] (рис. 1).

Одними из наиболее ответственных деталей современных ГТД являются валы и диски. Они представляют собой тела сложной геометрии, объединяющие различные сочетания гладких шеек, шлицев, резьбы, зубчатых колес, фланцев и т.д.

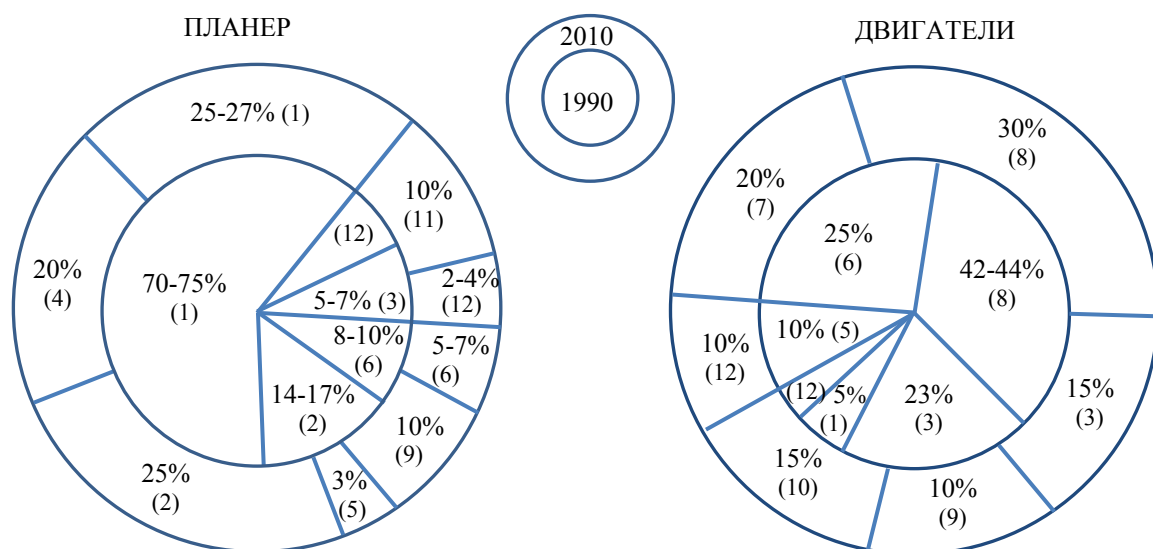


Рис. 1. Состояние и перспективы использования материалов в авиационной промышленности: 1 – традиционные алюминиевые сплавы; 2 – полимерные композиционные материалы; 3 – титановые сплавы; 4 – алюминий-литиевые сплавы; 5 – магниевые сплавы; 6 – стали; 7 – теплопрочные стали; 8 – жаропрочные сплавы; 9 – пожаробезопасный титан; 10 – интерметаллидные материалы, КМ; 11 – материалы с обратной связью; 12 – другие материалы [5]

Валы выполняются полыми, тонкостенными, ступенчатыми и отличаются ажурностью конструктивной формы и наличием большого количества ответственных элементов. Минимальная толщина их стенок может достигать 1,6 ... 4,0 мм с допуском на разностенность, равным 0,1 ... 0,2 мм, длина достигает 2,5... 3,0 м. Конструкторские поверхности валов выполняются в пределах 5-го квалитета точности. Используемые материалы имеют низкий коэффициент обрабатываемости методами лезвийной обработки по отношению к стали 45, например, для вала низкого давления ротора ГТД (15X12H2MBФАБ) он равен 0,3.

Диски ГТД имеют сложный фасонный профиль поверхностей вращения со строгими требованиями к качеству поверхности слоя и к расположению свободных поверхностей. Основные конструктивные элементы дисков, – это обод (венец с пазами) для крепления лопаток, полотно (диафрагма), ступица и фланцы для связи с соседними дисками и валом. К особенностям изготовления дисков относят высокие требования к физико-механическим свойствам используемых материалов. Обрабатываемость таких материалов низка. Например, по отношению к стали 45, коэффициент обрабатываемости резанием хромоникелевого сплава ХН62БМКТЮ, применяемого для изготовления дисков первой ступени турбины, равен 0,04, а сплава ВТ-9, применяемого для изготовления дисков компрессора, 0,2. [6]

Анализ структуры типовых технологических процессов изготовления дисков и валов ГТД [6, 7, 8] показывает, что наиболее значительный вес в процессе изготовления этих деталей имеют токарные операции.

Процесс механической обработки дисков, например, первой ступени турбины, условно делится на четыре основные части. При обработке исходной заготовки диска в первой части технологического процесса выполняется основная токарная обработка контура; сформируется чистовой контур профиля полотна диска; подготавливаются технологические базовые поверхности для дальнейшей обработки заготовки. В последующих частях применяют другие операции механообработки – протягивание, фрезерование и т.д. [6].

Процесс механической обработки вала ротора низкого давления, заготовка которого имеет относительно небольшие припуски на механическую обработку, также условно разделен на четыре части. В первой части технологического процесса точением обеспечивается формирование предварительного контура заготовки. Во второй – применяются токарные операции для выполнения полуступенчатой обработки основных поверхностей вала и формирования профиля вала, близкого к профилю готовой детали. В третьей – обеспечиваются точением и шлифованием качественные показатели вала для основных поверхностей. Четвертая часть технологического процесса изготовления вала является завершающим этапом механической обработки, на котором выполняется отделка поверхностей, обрабатываются мелкие выемки, пазы, отверстия и другие элементы.

В структуре типовых технологических процессов изготовления серийных валов роторов КВД точение достигает 70% от всего объема обработки и превосходит сверление примерно в 3 раза, а шлифование, притирку, фрезерование и др. в десятки раз (рис.2). [8]

Токарной обработкой обеспечивается съём максимального объема материала обрабатываемых заготовок.

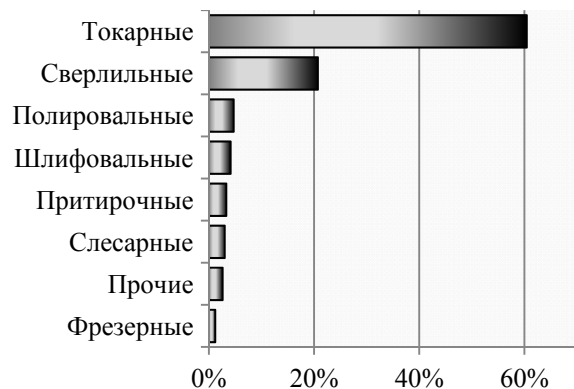


Рис. 2. Доля токарных операций в структуре технологического процесса изготовления вала ротора КВД [8]

оказывающие доминирующее влияние на эффективность обработки. На наш взгляд, следует проанализировать влияние на энергосиловые, динамические, тепловые факторы процесса, а также износ инструмента характеристик обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки, геометрии режущего клина (Рис. 3).

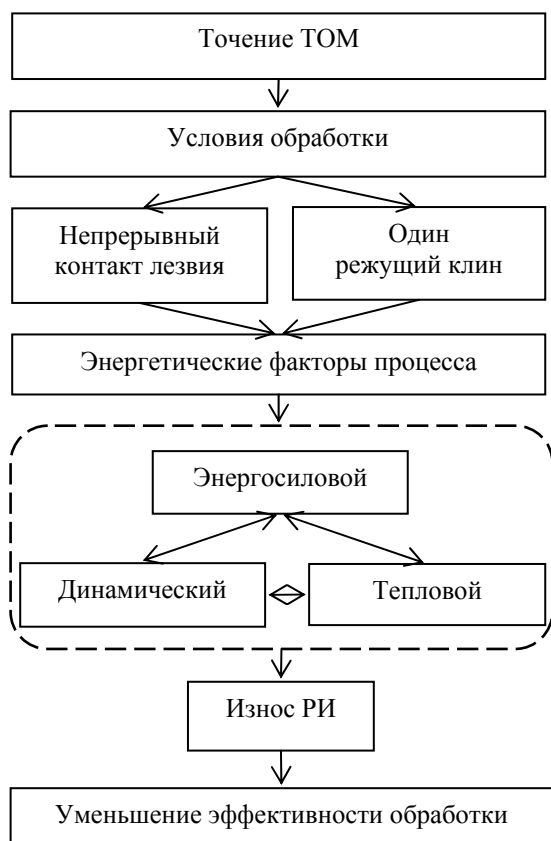


Рис. 3. Влияние особенностей точения ТОМ на эффективность обработки

В зависимости от исходных параметров точности и качества поверхности готового изделия, этот вид обработки может быть либо окончательным, либо подготовительным для последующих технологических операций и, вследствие этого, превышать половину объема всей обработки резанием, что подчеркивает актуальность интенсификации обработки ТОМ точением. Для построения феноменологической модели интенсификации процесса точения ТОМ, необходимо выявить особенности рассматриваемой системы резания и механизм её функционирования, включающий одновременно протекающие процессы: стружкообразования, изнашивания режущего инструмента, образования новых поверхностей и др.; установить технологические параметры процессов,

С этой целью нами изучены научные работы [9, 10, 11] посвященные вопросам влияния технологических характеристик ТОМ, процесса разрушения в зоне резания, износа инструмента, энергетических факторов и условий обработки. Изучены и проанализированы существующие современные методы повышения интенсивности токарной обработки ТОМ.

3. Методы интенсификации точения ТОМ

Основным препятствием на пути повышения эффективности процесса резания ТОМ является низкая обрабатываемость, которая обусловлена химическим составом сплавов, их физико-механическими свойствами и структурой, сформированной после термической обработки.

Понятие прочности и пластичности неразрывно связано с понятиями дислокаций, являющихся элементарными носителями пластической деформации [12]. Теория дислокаций широко применяется для объяснения механизма пластического деформирования. В рамках этой теории макроскопические особенности протекания того или иного процесса объясняются микроскопическими механизмами зарождения, движения и взаимодействия дефектов кристаллического строения, а процесс скольжения при резании рассматривается как результат смещения дислокаций. При этом считается, что разрыв атомных связей в кристаллической решетке происходит под действием локальных напряжений в результате их концентрации вблизи дефектных участков структуры с очень небольшими средними напряжениями по сечению.

В работе [13] отмечено, что при обработке металлов резанием с предварительным подогревом может иметь место тесно связанный с дислокационной картиной скольжения диффузионный механизм деформации в сочетании с деформацией сдвига или двойникованием. Вполне очевидно, что изменяя подвижность дислокаций, можно управлять пластической деформацией твердых тел, а, следовательно, влиять на эффективность процесса резания [12].

В работе [14] дана подробная систематизация основных направлений совершенствования процесса резания через «адреса» воздействий в виде двух групп – «А» и «Б». Группа «А» включает мероприятия, отнесенные к условиям обработки. Таковыми являются воздействия на заготовку, оборудование, инструмент,

кинематику и режимы резания, а также выбор и разработка эффективных методов подвода технологической среды. Группа «Б» описывает методы непосредственного управления физико-химическими процессами: упругими и пластическими деформациями, контактными и тепловыми явлениями, изменением фазового состава материала, химическими и электромагнитными процессами и явлениями.

На наш взгляд возможные пути интенсификации точения следует начинать рассматривать с микроуровня контактных явлений, протекающих в зоне обработки. С этой точки зрения удобно проанализировать основные направления интенсификация обработки резанием.

3.1. Анализ методов интенсификации точения ТОМ

Прогрессивными для интенсификации процесса резания труднообрабатываемых материалов являются комбинированные методы обработки, основанные на использовании дополнительных источников энергетического воздействия на обрабатываемый материал в зоне резания.

Обработка с дополнительным тепловым воздействием – широко применяемый в производстве метод, при котором используют либо сплошной нагрев материала заготовки в печах, либо локальный нагрев, реализующийся через плазменный, лазерный, индукционный, электроконтактный или фрикционный вид нагрева в комбинации с дополнительной механической энергией. Метод эффективен для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких, а также нержавеющей и жаропрочных материалов, но имеет ряд существенных недостатков. При сплошном нагреве есть необходимость установки печей в механических цехах, требуется применение средств защиты станков от теплового воздействия, возникают трудности, связанные с перемещением и закреплением заготовок. При локальных способах нагрева наблюдается выделение вредных аэрозолей, яркое свечение, шум, невысокое качество поверхности (плазменный нагрев); сложность обслуживания установок, их высокая энергоемкость и стоимость, малый КПД (лазерный нагрев). Использование процесса индукционного нагрева затруднено при обработке заготовок с неравномерным припуском, КПД установки является невысоким, возможно возникновение дефектного слоя на поверхности детали вследствие значительного прогрева заготовок. При электроконтактном нагреве используется энергоемкая установка, способ сложен в обслуживании.

Резание с опережающим пластическим деформированием [15] – метод, при котором используются в качестве дополнительного механического источника энергии разные способы поверхностного пластического деформирования: накатывание роликом, ультразвуковое упрочнение, чеканка, выглаживание, центробежная обработка. Недостатком является необходимость в дополнительной оснастке и модернизации оборудования.

Вибрационное резание с электрическим подогревом требует согласования подачи импульсов тока с критическим состоянием упругопластического деформирования зоны резания. Отсутствие согласованности приводит к нежелательному нагреву зон контакта обрабатываемого материала с задней поверхностью инструмента и является причиной ввода избыточной электрической энергии, и, следовательно, термических перенапряжений в поверхностных слоях обрабатываемой детали; возможно возникновение микроискрений, сопровождающих разрыв электрических цепей. Основными недостатками являются: перерасход энергии, снижение стойкости инструмента, сложность поддержания акустического контакта, ограниченность геометрических размеров устройств для получения резонансного режима работы, трудности, связанные с конструктивным решением промышленных установок.

Высокоскоростная обработка с дополнительным тепловым воздействием, реализуемая с помощью фрикционного диска, с установленным на торцевую поверхность резцом из твердого сплава [11]. ВСО производится в основном на легких сплавах и конструкционных материалах, обеспечивая высокое качество поверхности и повышение производительности при ограничивающем факторе стойкости РИ. Обработка же труднообрабатываемых материалов с тепловым воздействием способствует повышению производительности, но обеспечивает в основном невысокое качество поверхности и осуществляется на невысоких скоростях резания 10... 100 м/мин. Основным недостатком этого метода является необходимость балансировки инструмента при высоких скоростях резания (свыше 10 м/с).

Обработка с воздействием импульсов электрического тока [10], - обработка, при которой через зону резания пропускают импульсы электрического тока и регулируют длительность импульсов и пауз в зависимости от фазы упругопластического деформирования материала в зоне резания по вибрациям режущей кромки резца. Система предполагает три возможных варианта функционирования: основной - с синхронизацией момента подачи импульсов тока в зону резания по фазе колебаний режущей кромки резца и два самонастраивающихся: с контурами самонастройки по амплитуде колебаний резца и температуре в зоне резания соответственно. Недостатками метода являются трудности, связанные с необходимостью синхронизации моментов подачи импульсов электрического тока и конструктивным решением промышленных установок.

Анализ рассмотренных выше комбинированных методов обработки, показывает, что реализованные технологические разработки, направленные на решение проблемы повышения эффективности точения ТОМ не являются исчерпывающими вследствие указанных недостатков. Очевидно наличие пробелов в исследуемой области, например, с технологической точки зрения не раскрыт потенциал поверхностных явлений, известных

как эффект Ребиндера, не достаточно исследованы методы непосредственного управления контактными и тепловыми явлениями интенсификации токарной обработки ТОМ.

Заключение

Повышение эффективности технологии изготовления деталей авиационных двигателей посредством интенсификации используемых в обработке процессов точения является необходимым условием обеспечения конкурентоспособности производимой продукции.

В механообработке дисков и валов ГТД токарные операции являются доминирующими.

Комбинированные методы обработки, основанные на использовании дополнительных источников энергетического воздействия на обрабатываемый материал в зоне резания, перспективны для интенсификации процесса точения труднообрабатываемых материалов.

Существующие технологические разработки направленные на повышение эффективности точения ТОМ обладают существенными недостатками.

Научные исследования в области интенсификации процесса точения следует направить на разработку прогрессивных методов непосредственного управления контактными и тепловыми явлениями в зоне резания.

Анотація. Сформульовано проблему підвищення ефективності виготовлення дисків і валів ГТД за рахунок інтенсифікації точіння. Розглянуто перспективи використання матеріалів у літакобудуванні. Надано оцінку об'єму використання токарних операцій у механообробці дисків і валів ГТД. Запропоновано феноменологічну модель інтенсифікації процесу точіння важкооброблюваних матеріалів. Стисло розглянуто основні методи вдосконалення процесу точіння. Зроблено огляд прогресивних комбінованих методів обробки різанням важкооброблюваних матеріалів. Зроблено висновок про актуальність дослідження методу безпосереднього управління контактними і тепловими явищами для інтенсифікації токарної обробки ТОМ.

Ключові слова: технологічний процес; ефективність; інтенсифікація; точіння; оброблюваність; комбіновані методи; вал; диск

Abstract. Purpose. Search for promising ways to intensify of the GTE discs and shafts hard materials turning. Analysis of the scientific advances in this field. Specification purpose of scientific research aimed at the intensification of turning.

Design/methodology/approach. The problem of increasing the efficiency of the GTE disks and shafts production through the intensification of the turning is still relevant because of the tendency of materials used in aircraft engine. With regard to the manufacturing processes of the gas turbine engines discs and shafts, the proportion of turning operations in the structure of some of them reaches 60%. The authors offer the phenomenological model of the intensification of difficult to cut materials turning and describe in short the basic methods of the cutting process improving. A review of the progressive combined machining methods of difficult to machine materials detects the presence of significant shortcomings. For a more elegant technical solution proposed the method of the direct control of contact and thermal phenomena for intensification of the difficult to cut materials turning.

Findings. In order to intensify the turning of the GTE discs and shafts necessary to investigate the possibility of implementing the method of direct control of contact and thermal phenomena during processing.

Originality/value. The phenomenological model of the intensification of difficult to cut materials turning is offered. The purpose of scientific research aimed at the intensification of turning is specified.

Keywords: technological process; efficiency; intensification; turning, machinability, combined methods, shaft, disc

Библиографический список использованной литературы

1. Воронько В.В., Научные основы автоматизированной сборки авиационных конструкций в условиях опытного и единичного производства [Текст] : дис. ... доктора тех. наук: 05.07.02. — Харьков, 2014. — 306 с. [В.Д.].
2. Крымов, В.В. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук, - Москва 1999, стр. 4
3. Елисеев, Ю. С. Современные технологии как необходимое условие создания наукоемкой продукции [Текст] / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов // Двигатель. – 2003. – № 6 (30). – С. 7–10.
4. Курин, М. А. Обоснование квантовой природы явлений и процессов, возникающих при активации зоны механической обработки [Текст] / М. А. Курин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та "ХАИ". – Вып. 61. – Х., 2013. – С. 82 – 89.
5. Колганов, И. М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1 [Текст] : учебное пособие / И. М. Колганов, П. В. Дубровский, А. Н. Архипов. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 148 с., ил
6. Демин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] : [учебник] / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
7. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей [Текст] : учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1996. - 480 с.: ил.
8. Мозговой, В. Ф. Обеспечение параметров качества полых валов ГТД технологическими методами [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мозговой Владимир Федорович. - Открытое акционерное общество "Мотор Сич". - Запоржье, 2002. - 326л. - Библиогр.: л. 311-323.

9. *Курин, М.А.* Исследование технологии планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей деталей авиационных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 13.05.2011; утв. 11.11.2011 / Курин Максим Александрович. – Х., 2011. – 179 с.
10. *Шадский, В.Г.* Точение деталей из труднообрабатываемых материалов при воздействии импульсов электрического тока [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01; / Шадский, Владимир Геннадиевич. – Тула, 2009. – 133 с.
11. *Насад, Т. Г.* Высокоскоростная лезвийная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания [Текст] : дис. ... д. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08; / Насад Татьяна Геннадиевна. – Саратов, 2005. – 399 с.
12. *Китель, Ч.* Квантовая теория твердых тел [Текст] / Ч. Китель. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
13. *Подураев, В.Н.* Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания [Текст] : В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977
14. *Ярославцев, В.М.* Методология совершенствования технологий промышленного производства и разработки новых методов обработки / В.М. Ярославцев. – Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (электронный журнал) РИНЦ 2012. - № 3 Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/> 03, март 2012
15. *Ярославцев В.М.* Резание с опережающим пластическим деформированием [Текст] /: учеб. пособие по курсу «Перспективные технологии реновации» / В.М. Ярославцев. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.

References

1. *Voron'ko V.V.*, Nauchnye osnovy avtomati-zirovannoj sborki aviacionnyh konstrukcij v uslovijah opytnogo i edinichnogo proizvodstva [Текст]: dis. doktora teh. nauk: 05.07.02. Har'kov, 2014. 306 p. [V.D.].
2. *Крымов, В.В.* Dissertacija v vide nauchnogo doklada na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskix nauk, Moscow 1999, str. 4
3. *Eliseev, Ju. S.* Sovremennye tehnologii kak neobhodimoe uslovie sozdanija naukoemkoj produkcii [Текст]. Ju. S. Eliseev, V. V. Krymov. Dvigatel'. 2003. No 6 (30). P. 7–10.
4. *Kurin, M. A.* Obosnovanie kvantovoj pri-rody javlenij i processov, vznikajushhix pri akti-vacii zony mehanicheskoj obrabotki [Текст]. M. A. Kurin. Otkrytye informacionnye i komp'-juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. Nac. ajerokosm. un-ta "HAI". Vyp. 61. H., 2013. P. 82 – 89.
5. *Kolganov, I. M.* Tehnologichnost' aviaci-onnyh konstrukcij, puti povyshenija. Chast'1 [Текст]: uchebnoe posobie. I. M. Kolganov, P. V. Dubrovskij, A. N. Arhipov. Ul'janovsk: UIGTU, 2003. 148 p., il
6. *Demin, F.I.* Tehnologija izgotovlenija os-novnyh detalej gazoturbinnih dvigatelej [Jelektronnyj resurs]: [uchebnik]. F. I. Demin, N. D. Pronichev, I. L. Shitarev; pod. obshh. red. prof. F. I. Demina. 2-e izd. Samara: Izd-vo SGAU, 2012. 1 jel. opt. disk (CD-ROM).
7. *Sulima, A.M.* Osnovy tehnologii proiz-vodstva gazoturbinnih dvigatelej [Текст]: uchebnik dlja studentov aviac. spec. vuzov. A.M. Sulima, A.A. Noskov, G.Z. Serebrennikov. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 1996. 480 p.: il.
8. *Mozgovoj, V. F.* Obespechenie parametrov kachestva polyh valov GTD tehnologicheskimi me-todami [Текст]: dis. kand. tehn. nauk: 05.07.04. Mozgovoj Vladimir Fedorovich. Otkrytoe ak-cionernoe obshhestvo "Motor Sich". Zaporozh'e, 2002. 326l. Bibliogr.: l. 311-323.
9. *Kurin, M.A.* Issledovanie tehnologii pla-netarnogo glubinnogo shlifovanija ploskih po-verhnostej detalej aviacionnyh dvigatelej [Текст]: dis. kand. tehn. nauk: 05.07.02; zashhi-shhena 13.05.2011; utv. 11.11.2011. Kurin Maksim Aleksandrovich. H., 2011. 179 p.
10. *Shadskij, V.G.* Tochenie detalej iz trud-noobrabatyvaemyh materialov pri vozdejstvii impul'sov jelektricheskogo toka [Текст]: dis. kand. tehn. nauk: 05.03.01; Shadskij, Vladimir Gennadievich. Tula, 2009. 133 p.
11. *Nasad, T. G.* Vysokoskorostnaja lezvijnaja obrabotka trudnoobrabatyvaemyh materialov s dopolnitel'nymi potokami jenerгии v zone reza-nija [Текст]: dis. d. tehn. nauk: 05.03.01, 05.02.08; Nasad Tat'jana Gennadievna. Sara-tov, 2005. 399 p.
12. *Kitel', Ch.* Kvantovaja teorija tverdyh tel [Текст]. Ch. Kitel'. Moscow: Nauka, 1967. 491 p.
13. *Poduraev, V.N.* Avtomaticheski reguli-ruemye i kombinirovannye processy rezanija [Текст]: V.N. Poduraev. Moscow: Mashinostroenie, 1977
14. *Jaroslavcev, V.M.* Metodologija sovershenstvovanija tehnologij promyshlennogo proizvod-stva i razrabotki novyh metodov obrabotki. V.M. Jaroslavcev. Nauka i obrazovanie (MGTU im. N.Je. Baumana) (jelektronnyj zhurnal) RINC 2012. No 3 Rezhim dostupa: <http://technomag.edu.ru/> 03, mart 2012
15. *Jaroslavcev V.M.* Rezanie s operezhajushhim plasticheskim deformirovaniem [Текст]: ucheb. posobie po kursu «Perspektivnye tehnologii renovacii». V.M. Jaroslavcev. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.Je. Baumana, 2010. 46 p.

Подана до редакції 12.07.2015