

УДК 65.0

DOI: 10.30987/article\_5cf7bd2fd406e3.91911126

С.В. Сафонов, д.т.н.,  
В.П. Смоленцев, д.т.н.,  
А.В. Мандрыкин, к.т.н.

(ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет,  
394026, Воронеж, Московский пр., 14)  
E-mail: safonov@vorstu.ru

## Методология отработки технологичности при запуске в производство наукоемких изделий авиакосмической техники

*Рассмотрен процесс оптимизации выбора комбинированных технологических процессов и обоснована необходимость создания новых способов и технологий, а также структура доказательной базы технолога при отработке технологичности на этапе запуска в производство новых изделий и согласования конструктивных изменений.*

**Ключевые слова:** технологичность; отработка; критериальный анализ; изделия авиакосмической техники.

S.V. Safonov, Dr. Sc. Tech.,  
V.P. Smolentsev, Dr. Sc. Tech.,  
A.V. Mandrykin, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HE Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Passage, Voronezh, 394026)

## Methodology of manufacturability optimization at introduction of science intensive aerospace products into production

*The process of optimization in a combined engineering process choice is considered and a necessity to create new methods and technologies, and also a structure of technologist's evidence basis at manufacturability optimization at the stage of the new products introduction into manufacturing and design changes agreement are substantiated.*

**Keywords:** manufacturability; optimization; criterion analysis; aerospace products.

### Введение

Известны работы российских технологических школ по повышению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, а также адаптации технологических методов обработки к эксплуатационным свойствам изготавливаемых деталей на стадии отработки технологичности осваиваемых производством созданных перспективных наукоемких изделий [1, 2]. К ним относятся исследования, выполненные в последние годы учеными и специалистами Воронежской научной школы в интересах авиакосмической отрасли, результаты которых приведены в работах [3–7].

В современных условиях происходит постоянный переход на новые изделия машиностроения, где требуется получить все новые повышенные эксплуатационные показатели при устранении или снижении ограничений по трудоемкости изготовления, обслуживания, себестоимости изделий [4]. Особенно сильно это проявляется в авиакосмической очень за-

тратной отрасли, и прежде всего, при наиболее наукоемком производстве двигателей, где сформировался новый подход к развитию технологической науки.

### Методология выбора и проектирования комбинированных методов обработки

Анализ достижений отечественных и зарубежных специалистов позволил сформировать основные направления обоснованного поиска и перспективного планирования исследований по обеспечению требуемых эксплуатационных показателей новых изделий [3]. В области комбинированных методов обработки можно наметить следующие направления научных и прикладных исследований:

– учитывая, в основном, достижения технологических исследований и создаваемые в мире аналоги, заказчик закладывает тактико-технические или эксплуатационные показатели новых изделий выше предыдущих (известных и прогнозируемых). Здесь объектом ис-

следований служит поверхностный слой, определяющий эксплуатационные показатели изделий;

– с учетом известного и прогнозируемого уровня развития технологии разработчик (ОКБ, КБ, АН, НИИ) закладывает в конструкцию объекты, обеспечивающие достижение заданных эксплуатационных показателей, заложенных заказчиком.

В работе [3] раскрыта структура и методология применения разработанного принципа полезности для обеспечения заданного качества создаваемых изделий, который включает основные варианты технологических решений:

– использовать уже известные и освоенные технологические решения, если они обеспечивают достижение требуемых эксплуатационных показателей. Это может относиться ко всему объекту или его отдельным частям. Оценочные показатели, как правило, получаются в процессе испытаний разработчиком наиболее ответственных частей конструкции, и выявляются граничные условия (например, себестоимость), при которых известный технологический процесс удовлетворяет заказчика. Но тут может быть использовано множество уже известных технологических способов, обеспечивающих получение заданных эксплуатационных показателей. Однако они могут не укладываться в ограничения, например по трудоемкости, себестоимости.

Потребовался новый подход к выбору из большого количества известных и создаваемых технологических методов наилучших для достижения заданных заказчиком эксплуатационных показателей, что позволяет научно обосновать назначение одного, наиболее эффективного, имеющего минимальное количество негативных факторов. Для этого необходимо синтезировать в одном техпроцессе несколько видов физических воздействий, образующих комбинированный способ обработки.

С этой целью предложен новый оценочный показатель – принцип полезности, который дает возможность выбрать, как правило, один технологический метод обработки, направленный на модификацию поверхностного слоя обрабатываемых деталей, выбранных разработчиком в качестве базовых для обеспечения генеральных эксплуатационных показателей создаваемого изделия. Из них нужно обосновать единый (как правило, комбинированный) технологический процесс, который может быть как освоенным, так и известным, но пока не используемым в исследуемой отрасли ма-

шиностроения. Или пока известный только по результатам экспериментальных исследований, на уровне патентов или опыта применения в других отраслях машиностроения, но не проверенный и не допущенный для изготовления наукоемких ответственных изделий в авиакосмической отрасли;

– генеральные эксплуатационные показатели создаваемых изделий закладываются заказчиком. В случае объектов авиакосмической отрасли – это тактико-технические требования и технические условия, которые, как правило, должны быть более высокими по сравнению с существующим аналогом.

Эксплуатационные показатели являются базой для разработки конструкции, где показатели детализируются и передаются исполнителю – технологу, который решает, как их обеспечить в производстве.

При этом формируется 3 варианта реализации проекта:

– часть детализированных эксплуатационных показателей соответствуют требуемому и уже используемому в аналоге уровню. Здесь, как правило, каких-либо исследований не требуется, хотя может оказаться, что для создаваемых изделий известны перспективные технологические процессы, которые могут быть применены взамен известных, но требуют дополнительных материальных затрат. В рассматриваемом случае используется принцип полезности, который позволяет объективно оценить целесообразность замены известного технологического способа на новый по критериальным оценкам, приведенным в [3], с учетом ограничений технического и экономического характера;

– часть повышенных эксплуатационных показателей может быть обеспечена синтезом конструкторских и технологических решений, где разработанные технологические способы позволяют достичь требуемых эксплуатационных показателей. При этом может быть множество технологических процессов, направленных на достижение генеральных эксплуатационных показателей, и технологу необходимо обосновать выбор наиболее выгодного технологического процесса. Это возможно только в том случае, когда первичный отбор вариантов выполняется с использованием принципа полезности.

Внутри выборки для заданных генеральных эксплуатационных показателей технолог проводит критериальную оценку каждого показателя как отношение заявленной величины к ранее достигнутой в используемых аналогах.

Одновременно технолог выполняет критериальный анализ технологических способов по сопутствующим показателям с учетом ограничений, например, по трудоемкости, себестоимости, оснащенности, наличию кадров. Выбор может выполняться с использованием положений алгебры Буля [3], где удается сравнивать качественные и количественные показатели как раздельно, так и совместно. При этом можно доказательно обосновать преимущества выбора технологического процесса путем детального качественного сравнения различных показателей, например, себестоимости изготовления, в условиях изменения ценовых показателей, что не доступно при упрощенном критериальном анализе;

– как правило, в каждом новом изделии заказчиком закладываются повышенные эксплуатационные требования к генеральным показателям, которые после анализа разработчиком воплощаются в форме конструкций, но на достигнутом уровне технологической науки не могут быть воплощены технологами в металле (или другом материале). Задача технолога заключается в том, чтобы привлечь научные кадры вузов и силы НИИ, чтобы с помощью принципа полезности установить или создать технологические способы, наиболее полно обеспечивающие получение заданных эксплуатационных показателей, близких к требуемым для создаваемых изделий наукоемкой техники.

### Методология отработки технологичности

Используя критериальную оценку возможностей новых способов обработки [3], можно установить численные показатели каждого из способов, и заложить научные основы отработки технологичности [4, 5] создаваемого изделия.

Должно быть достигнуто согласие между изготовителем и разработчиком, где последний знает, что нужно изготовить и какие обеспечить эксплуатационные параметры, но менее владеет возможностями их изготовления. Используется принцип полезности и критериальная оценка прогнозируемых технологических методов, как отношение требуемых заказчиком эксплуатационных показателей к используемому в аналоге в настоящее время.

При этом в качестве критерия учитывается отношение показателей новых технологических разработок к тому же объекту с известным достигнутым уровнем. Обычно при кри-

тертальной оценке результат получается ниже, чем требует заказчик, и здесь начинается отработка технологичности нового изделия [4], где технолог, базируясь на информационной базе и своём опыте, либо доказывает с помощью критериальной оценки невозможность достичь заложенного в конструкции показателя, либо согласовывает сроки и стоимость технологических исследований для обеспечения изготовления изделия с заданными эксплуатационными показателями.

Отработка технологичности завершается после согласования и решения технологом всех вопросов изготовления деталей, обеспечивающих требуемые эксплуатационные показатели изделий. В новых объектах производства, как правило, требуется создание и проектирование принципиально новых, главным образом, комбинированных техпроцессов, определяющих свойства поверхностного слоя и обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных показателей изделия.

Методология этого этапа работы включает следующее: по принципу полезности оценивают возможность реализации изготовления спроектированного разработчиком изделия с заданными эксплуатационными показателями. Для этого используют критериальную многопараметрическую систему Буля [3] с оценкой относительно достигнутого уровня достижимых и заданных показателей.

Для достижения требуемых показателей выдаются технические задания на разработку новых технологических процессов. В авиакосмической отрасли для этого приходится использовать новые технологические приемы, где наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки с наложением электрического поля. К ним относятся методы, где в одном технологическом процессе объединяется несколько видов воздействий (механические, тепловые, магнитные, химические, ядерные, и их разновидности). Целью таких сочетаний воздействий является достижение повышенных технологических показателей и снижение ограничений в имеющихся технологических процессах.

### Направления технологических исследований по созданию новых способов и устройств для комбинированной обработки

Эксплуатационные показатели изделий определяются состоянием поверхностного слоя, свойствами материалов деталей и инструмен-

та, возможностями традиционных методов обработки, которые могли достигнуть к рассматриваемому периоду предельного технического совершенства. Поэтому наиболее перспективно применение комбинированных методов и аддитивных технологий, которые пока находятся в стадии разработки [6, 7]. Эти виды технологических воздействий могут быть связаны между собой, т.к. например, изменение в нужном направлении свойств поверхностного слоя может придавать новые свойства покрытиям, формирующим требуемые эксплуатационные показатели. Это может достигаться, в числе прочих способов, формированием профиля с помощью аддитивных технологий, которые находятся в стадии исследований и испытаний.

Предлагаемая методология предполагает возможность разработки научно обоснованного технического задания на новые технологические процессы, пути модификации поверхностного слоя с использованием комбинированных методов обработки, для которых после создания новых способов [6, 7] могут проектироваться перспективные технологические процессы, обеспечивающие получение требуемых эксплуатационных показателей. Если в результате выполнения этого этапа работы они достигаются, то на такой стадии заканчивается отработка технологичности нового изделия [1, 2], и оно передается предприятию-изготовителю для освоения в серийном производстве.

### Использование принципа полезности в машиностроении

Для реализации приложений рассматриваемой методологии выбирается конкретный объект производства с техническими требованиями, заданными разработчиком. Здесь могут быть три варианта модификации поверхностного слоя [3]: со структурными изменениями без изменения геометрии; путем нанесения покрытия, обеспечивающего требуемые эксплуатационные показатели; удалением дефектного поверхностного слоя, что повышает эксплуатационные показатели изделия (рис. 1, 2).

Объектом исследования может быть технологическая оснастка, широко используемая в машиностроении. Авторами рассмотрены контейнеры для двухсторонней электрохимической и комбинированной эрозионно-химической обработки пера стальных (рис. 1, а) и титановых (рис. 1, б) лопаток реактивных авиационных двигателей, где поведение и

стойкость оснастки зависит от материала и других свойств обрабатываемых заготовок.

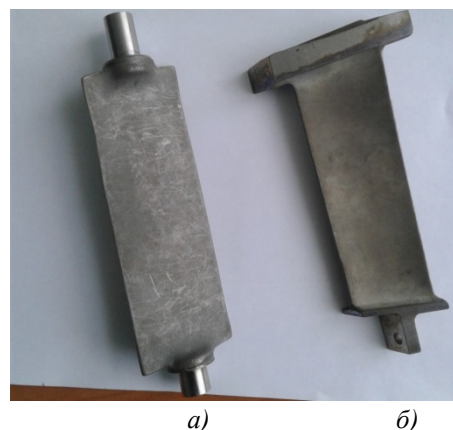


Рис. 1. Сопловые лопатки авиационных двигателей: а – из стали; б – из титанового сплава

Критерием оценки полезности является эксплуатационная технологичность в форме максимального межремонтного периода. Здесь нельзя изменять геометрию базовых поверхностей за счет нанесения покрытий или удаления дефектного слоя. Можно только модифицировать свойства поверхностного слоя, придав ему стойкость от анодного растворения. Используя принцип полезности, были выбраны известные технологические приемы обработки, связанные с подбором материала оснастки (производственная отработка технологичности), а также с применением химико-термических методов обработки, физико-механических способов (упрочнение) [3, 5] и др. Проанализировано более ста вариантов модификации поверхностного слоя, которые были оценены по критериям стойкости оснастки в условиях анодного процесса.

Установлены критериальные показатели, под которыми понимается отношение межремонтного периода оснастки после различных видов модификации поверхностного слоя к базовому варианту, используемому в производстве при выпуске аналогичных изделий. На рис. 2 показана охлаждаемая лопатка перспективного авиационного двигателя, где для обеспечения заданной точности профиля пера понадобилась оснастка, практически не имеющая износа.

В результате критериального анализа установлено, что для повышения износостойкости контейнеров положительный эффект может быть достигнут путем создания нового метода [7], отвечающего принципу полезности, основанного на разработанном технологическом методе (защищен как изобретение). По крите-

риальной оценке получены показатели повышения стойкости до 1,5 раз, а в перспективе с учетом проводимых разработок – до 2 раз. Это дало возможность увеличить эксплуатационную технологичность и достичь повышения стойкости оснастки до 15 раз, что отвечает запросам современного производства.

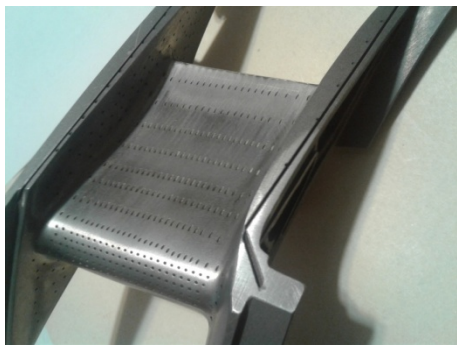


Рис. 2. Охлаждаемая лопатка направляющего аппарата реактивного двигателя

Еще большие возможности по увеличению стойкости дает замена материала оснастки с использованием новой технологии и модификации [3], что находится в стадии разработки.

Аналогичные исследования выполнены [4, 5] для технологических процессов с удалением дефектного слоя и нанесением покрытий, которые определяют критериальные показатели для применения принципа полезности и критериального обоснования выбора из имеющихся или обоснования необходимости проведения технологических исследований для создания новых, в основном комбинированных методов обработки, значительная часть которых представлена в работе [3] в форме защищенных патентами результатов экспериментальных исследований, опыта использования для единичных изделий на стадии внедрения в производство комбинированных техпроцессов [6, 7].

### Заключение

Приведенный в работе анализ создаваемой в авиакосмической отрасли техники новых поколений показал, что предложенная методология оценки и повышения уровня эксплуатационных показателей создаваемой наукоемкой техники широко используется заказчиками, разработчиками и, в основном, технологами, в процессе оптимизации выбора и обоснования разработки новых технологических методов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Технологическое** обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин/ О.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
2. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с. (Библиотека технолога).
3. **Сафонов С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. – 224 с.
4. **Портных А.И., Смоленцев В.П., Скрыгин О.В.** Отработка технологичности изделий под электрические методы обработки // *Научные технологии в машиностроении*. 2018. №11. С.30-34.
5. **Научные** технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2012. -528 с.
6. **А.С. № 1085734 (СССР).** Способ электро-химико-механической обработки. Бюл. изобр. №14, 1984.
7. **Пат. 2619410 РФ. В23Н** Способ плазменного напыления покрытий / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.В. Сафонов, М.В. Кондратьев, Е.С. Бобров. Заявка 2015101658 от 20.01.15 . Оpub. 15.05.17. Бюл. №14.

### REFERENCES

1. *Technological Support of Machinery Operation Properties* / O.V. Ryzhov, A.G. Suslov, V.P. Fyodorov. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 176.
2. *Technological Support and Operation Properties Increase in Parts and Their Joints* / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko et al.; under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 448 (Technologist's Library).
3. Safonov, S.V. *Technological Support of Product Operation Properties*. Voronezh: IPC VSU, 2015. pp. 224.
4. Portnykh, A.I., Smolentsev, V.P., Skrygin, O.V. Product manufacturability optimization for electric processing methods // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2018. No.11. pp. 30-34.
5. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / under the editorship of A.G. Suslov. М.: Mechanical Engineering. 2012. – pp. 528.
6. Author's Certificate No. 1085734 (USSR). *Method of Electric-Chemical-Mechanical Processing*. Bull. of Inventions No. 14, 1984.
7. Pat. 2619410 RF. B23N *Method of surface plasma sputtering* / V.P. Smolentsev, E.V. Smolentsev, S.V. Safonov, M.V. Kondratiev, E.S. Bobrov. Application 2015101658 of 20.01.15. published: 15.05.17. Bull. No. 14.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев