

УДК 621.9.047
DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-27-32

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: vsmolen@inbox.ru

Повышение эффективности комбинированных технологий изготовления изделий с использованием принципа полезности

Разработаны концепция и принципы построения комбинированной технологии изготовления перспективных изделий с высокими эксплуатационными характеристиками, затребованными заказчиком и заданными разработчиком, путем сочетания в едином технологическом процессе возможных физических воздействий для модификации поверхностных слоев материалов и нанесения покрытий на детали наукоёмких объектов машиностроения.

Ключевые слова: принцип полезности; наукоёмкая техника; технологическое воздействие.

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 Avenue, Voronezh, 394026)

Effectiveness increase in combined technologies for manufacturing parts using utility principle

There is developed a concept and principles of combined technology formation for manufacturing promising products with high operation characteristics demanded by a customer and specified by a designer by means of the combination in a single engineering process of possible physical impacts for the modification of material surface layers and coating application upon parts of science intensive objects in mechanical engineering.

Keywords: utility principle; science intensive engineering; technological impact.

Введение

Одним из путей развития наукоёмких направлений технологической науки стали комбинированные методы обработки, где в едином технологическом процессе используется несколько взаимосвязанных внешних воздействий, базирующихся на механических, тепловых, химических и других физических явлениях, результат действия которых можно оценить с использованием теории подобия, разработанной В.Ф. Безъязычным и учениками его научной школы [1].

Это позволило существенно расширить технологические возможности применяемых и разрабатываемых методов изготовления наукоёмких изделий, что отвечает запросам, в первую очередь, авиакосмической отрасли, где без использования таких способов сложно осуществить серийное производство новых конкурентоспособных изделий. В основу ра-

боты положен предложенный авторами принцип полезности.

Обобщенный принцип полезности

Принцип полезности [2] объединяет показатели уровня эффективности воздействия значимых параметров технологического процесса на эксплуатационные характеристики деталей, которые в значительной степени зависят от состояния их поверхностного слоя. В современной технологической науке наибольшее количество исследований направлено на повышение качества изделия, особенно для наукоёмкой продукции новых поколений создаваемой техники. Однако при этом следует принимать во внимание различные ограничения или вероятность негативного воздействия, снижающего некоторые полезные показатели (например, экономические) в процессе серийного производства [2, 3].

Эффективность использования принципа полезности [4] оценивается комплексом векторных критериальных воздействий на поверхностный слой, формируемый при оптимальном, научно обоснованном комбинированном сочетании составляющих факторов в едином технологическом процессе, учитывающем индивидуальные особенности эксплуатации изделия.

Предлагаемый принцип устанавливает связи между технологами и разработчиками. Он позволяет на стадии отработки технологичности проектируемой наукоемкой продукции разработать методику прогнозирования потребности в создании новых комбинированных технологических процессов для выпуска очередных поколений техники и выполнить предварительное обоснование объемов финансирования на выполнение заказа.

В авиакосмической отрасли машиностроения используют три вида показателей полезности, которые служат для оценки эффективности технологических воздействий на эксплуатационные характеристики изделий:

– первый, заложенный в техническом задании заказчиком, обеспечивающий финансирование проекта и реализуемый проектантом создаваемого изделия для получения конкурентоспособной продукции;

– второй показатель – достигнутый в рассматриваемый период времени в промышленности, мировой уровень такого показателя;

– третий – теоретически или экспериментально обоснованный и полученный, хотя бы на единичных экземплярах опытных изделий, показатель принципа полезности, подтвержденный исследователями или технологами, достаточный для обоснования реализации его в производстве.

В процессе отработки технологичности интересы заказчика и разработчика новой продукции полностью совпадают, но они ограничены возможностями технолога, который на этой стадии создания нового изделия не имеет достаточного количества достоверных технологий, необходимых для получения желаемых эксплуатационных показателей.

При этом перед реализацией таких процессов необходимо обосновать материальные и временные затраты на эти цели, учесть сложности ускоренного освоения наукоемкой техники (например, в авиакосмической отрасли), где происходит систематическая замена объектов производства, а период технологической подготовки при запуске в производство новых изделий сильно ограничен.

Механизм технологического воздействия на повышение эксплуатационных показателей изделий

Эффективность воздействий в каждом создаваемом комбинированном технологическом процессе оценивается с использованием принципа полезности по предложенным критериям [3, 4]:

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} P_{o1} &\geq P_{p1}, \\ \vec{K}_{o2} P_{o2} &\geq P_{p2}, \\ \vec{K}_{om} P_{on} &\geq P_{pn}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{on}; K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{om}$ – величины векторных показателей критериев полезности при технологическом воздействии на уже достигнутый и предельно достижимый уровень на современном этапе развития технологической науки. Это эксплуатационный показатель, зависящий от характеристик поверхностного слоя детали;

m – количество технологических воздействий в комбинированном процессе, используемых путем изменения поверхностных свойств деталей для достижения требуемых эксплуатационных показателей изделий; $P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{on}$ – показатели, достигнутые за счет воздействия на поверхностный слой детали при используемых способах обработки изделий; $P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$ – показатели заданных разработчиком эксплуатационных характеристик перспективного изделия, зависящие от состояния их поверхностного слоя; n – количество значимых показателей, необходимых для получения требуемых эксплуатационных характеристик изделия.

Приложение принципа полезности к выбору технологических воздействий на поверхностный слой материалов

Эффективность использования критерия полезности (1) для повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя материалов оценивают [5] по уровню его положительного воздействия на эксплуатационные показатели изделия, приведенные в табл. 1, с учетом экономических ограничений в рамках выделенных средств на создание нового наукоемкого изделия. В табл. 1 приведена количественная и качественная сравнительная оценка эффективности основных воздействий, которые могут влиять на критерий полезности при реальных условиях их применения.

В табл. 1 не включены те технологические методы (например, цементация, азотирование, цианирование), которые детально рассмотрены в справочной литературе [3]. Значительная часть комбинированных технологических

способов и воздействий, приведенных в работе [5] и в табл. 1 пока недостаточно изучена, хотя без этих способов невозможно изготовление перспективных изделий.

1. Критериальная оценка действия вектора полезности при различных видах технологических вариантов воздействия на поверхностный слой материалов [5]

Виды технологических воздействий	Варианты воздействий	Действие вектора критерия полезности на эксплуатационные показатели изделий (+ - повышение, - - снижение, 0 – не оказывает существенного воздействия, oo – влияет при особых условиях)					
		Восстановление исходных эксплуатационных свойств	Жаростойкость	Износостойкость	Усталостная прочность	Защита от внешних воздействий	Придание новых эксплуатационных свойств
Без изменения поверхностного слоя	Химикотермическое *	0	0	+	+	+	oo
	Виброупрочнение	0	0	0	+	oo	oo
Со снятием:							
- припуска	МО** и ЭМО***	+	0	oo	-	-	+
- покрытия	Магнитовибрационное удаление толстых покрытий	+	0	oo	0	0	+
С наращиванием:							
- однородного слоя	ЭЭП****	0	+	+	-	+	+
	Лазер	0	+	+	0	+	+
	Ионоплазменные (ИП)	0	0	+	0	0	+
- слоя с гранульными включениями	Лазер	0	+	+	oo	oo	oo
	ИП	0	+	+	oo	+	oo
	ЭХ*****	oo	+	+	-	0	oo

* электроэрозионное легирование в среде жидких газов

**МО – механическая обработка

***ЭМО – электрические методы обработки

****ЭЭП – электроэрозионное покрытие

*****ЭХ – электрохимическое покрытие

Предлагаемый критерий полезности открывает возможность обосновать последовательность выполнения заказов со стороны разработчиков на реализацию новых комбинированных методов обработки с учетом эксплуатационных показателей объектов очередных поколений техники.

Анализ табл. 1 показывает, что для повышения эксплуатационных характеристик изделий путем нанесения однородного слоя можно получать материалы с новыми полезными свойствами при сохранении или восста-

новлении полезных качеств (оценивается по критерию полезности) за счет примененных химических и/или термических воздействий в процессе получения покрытий на материалах. В случае использования теплозащитных покрытий с минералокерамическими гранулами (см. табл. 1) удастся повысить ресурс и надежность камеры сгорания и реактивного сопла ракетных и авиационных двигателей, сохраняя и улучшая полезные показатели основного материала.

В работе [5] приведена информация о при-

дании новых эксплуатационных свойств материалам путем нанесения теплостойкого толсто-стенного чугунного покрытия на легкоплавкие алюминиевые сплавы, применяемые в горячей зоне летательных аппаратов. Это позволяет совместить полезные свойства (низкая удельная масса) основного материала с защитой его от действия агрессивных сред и достичь повышенной износостойкости узлов трения изделия.

Примеры обработки технологичности с использованием принципа полезности

При обработке производственной технологичности широко используется замена традиционных способов обработки на комбинированные технологические процессы с наложением электрического поля. Так, на рис. 1 приведена схема комбинированного получения отверстий малого (от 0,05 до 0,1 мм) диаметра в фильтрах очистки топлива в листовых заготовках фотохимическим методом по шаблонам. В заготовке 1 форма, положение и количество отверстий создается по несъемному шаблону 2, который обеспечивает одновременное получение до нескольких тысяч каналов при их погрешности не выше 6 – 7 квалитета.

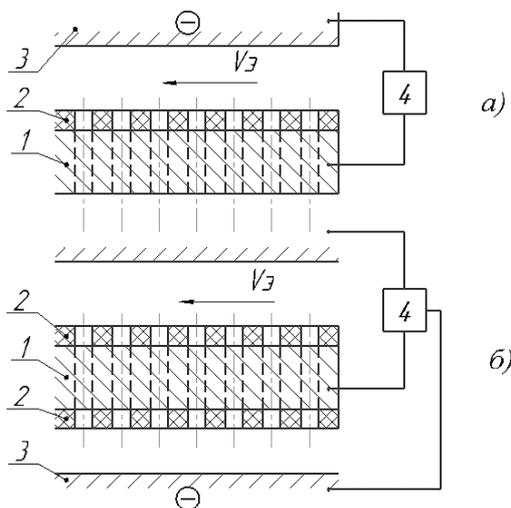


Рис. 1. Схема анодного формирования отверстий по диэлектрическому шаблону в листовых заготовках: а – по схеме односторонней прошивки; б – при двухсторонней обработке; 1 – тонколистная заготовка; 2 – диэлектрический шаблон; 3 – электрод; 4 – источник питания током; v_3 – скорость прокатки электролита

Процесс одновременной прошивки всех отверстий происходит анодным растворением

с малым (6...15 В) напряжением при постоянном токе, подаваемым от источника питания 4 на электрод 3 и заготовку 1 через шаблон 2. Для тонких листовых заготовок могут использоваться односторонние диэлектрические шаблоны 2 (см. рис. 1, а). При этом с увеличением глубины отверстий скорость прошивки снижается. Для получения качественных отверстий при односторонней прошивке рекомендуется их предельную глубину ограничить 0,3...0,5 мм. Эта величина зависит от марки и состояния материала заготовки, технических требований к детали и других факторов. Наибольшая толщина заготовки из сталей и цветных сплавов при двухсторонней обработке, как правило, не превышает 1 мм. В этом случае шаблоны наносят на противоположные стороны заготовки (рис. 1, б) и совмещают оси отверстий.

Для интенсификации обработки скорость прокачки электролита (v_3 , см. рис. 1) увеличивают пропорционально росту толщины заготовки и количества одновременно изготавливаемых отверстий. Нижний предел скорости при односторонней обработке составляет 1...2 м/с, двухсторонней – 2...3 м/с.

При проектировании технологического процесса изготовления отверстий в фильтрах (см. рис. 1) выполняют следующие этапы:

1. Для отверстий рассчитывают диаметры или размеры этих элементов в шаблоне с учетом расширения такой величины в детали со стороны шаблона. Этот размер находят, учитывая радиус скругления кромки в начале отверстия, толщину заготовки (h_1 или h_2), межэлектродный зазор S , толщину шаблона.

Необходимо учитывать, что прошивка отверстий в фильтре происходит под действием локального электрического поля, границы которого на заготовке 1 определяются диэлектрическим шаблоном 2, вплотную нанесенном на одну или обе поверхности заготовки (см. рис.1). Шаблон заменяет профильные электроды, которые расположены в непосредственной близости друг от друга, поэтому их изготовление не всегда возможно и в любом случае требует больших затрат.

На этом этапе выполняется обработка технологичности с использованием критерия полезности. Анализ вариантов обработки показал, что способ эффективен при любом количестве отверстий произвольного сечения с прямолинейной и изогнутой осью, в том числе с переменной кривизной.

Ограничением возможности прошивки является толщина заготовки h , а количество од-

новременно получаемых отверстий зависит от прочности и жесткости шаблона. С появлением новых композиционных материалов, в том числе металлических, это ограничение практически снимается, что должно учитываться при обосновании технологичности по критерию полезности.

Если листовая заготовка имеет толщину, соизмеримую с толщиной шаблона h_1 , то фильтрующая способность изделия может снижаться из-за «уширения» L и радиуса скругления кромки, что может вызвать возрастание величины перемычек между соседними каналами и ухудшение эксплуатационного показателя – фильтрующей способности изделия.

С увеличением межэлектродного зазора S происходит рассеивание электрического поля, изменяется характер течения через него электролита и погрешность отверстия может возрастать. В пределах $\pm 10\%$ такое «уширение» не оказывает заметного влияния на фильтрующую способность изделия, хотя и может незначительно снижать просвет отверстия.

При использовании заготовок толщиной h

шаг между отверстиями в шаблоне $L_{ш}$ необходимо увеличивать на величину:

$$L_{ш} = K_1 h_1, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, изменяющийся от 0,2 до 0,1.

Расстояние между отверстиями L_1 выбирают с учетом прочности и жесткости шаблона в зависимости от «уширения» L , сохраняя величину перемычки l , достаточную для сохранения эксплуатационной прочности фильтра (обычно около 0,1 мм):

$$L_1 = 2L + 1. \quad (3)$$

2. При положительных результатах оценки эффективности нового способа по критерию полезности с использованием зависимостей (2) и (3) проектируют чертеж шаблона.

3. Фотохимическим (или аналогичным методом) наносят на одну или обе (см. рис. 1) стороны заготовки контур шаблона.

4. Электрохимической обработкой по схеме с неподвижными электродами прошивают сквозные отверстия в тонкостенных металлических фильтрах, используя режимы из табл. 2.

2. Технологические режимы для прошивки отверстий при односторонней и двухсторонней обработке

Размер рабочей части фильтра, мм	h , мм	S , мм	Напряжение на электродах, В	v_z , м/с	Примечание
до 20	до 0,2	0,1÷0,2	6÷8	1÷2	Односторонняя прошивка
	0,2÷0,4	0,15÷0,2	8÷10	2÷3	Двухсторонняя обработка
	0,4÷1,0	0,2÷0,3	10÷12	2÷3	
20÷50	до 0,2	0,2÷0,25	8÷10	2÷3	Односторонняя прошивка
	0,2÷0,4	0,02÷0,3	10÷12	2÷3	Двухсторонняя обработка
	0,4÷1,0		12÷15	3÷4	
Свыше 50	до 0,2	0,25÷0,3	10÷12	2÷3	Односторонняя прошивка
	0,2÷0,4	0,3÷0,4	12÷15	2÷4	Двухсторонняя обработка
	0,4÷1,0	0,4÷0,5	12÷15	3÷4	

На рис. 2 приведен фильтр, полученный односторонней прошивкой, где время изготовления 4000 отверстий в заготовке из нержавеющей стали толщиной 0,08 мм не превысило 1,2 мин, что, с учетом необходимости последующего трудоемкого удаления заусенцев и большого отхода деталей из-за разрыва перемычек, существенно меньше по сравнению со штамповкой.

При изготовлении фильтров (см. рис. 2) погрешность не превышает 0,1 мм при шероховатости поверхности отверстий $Ra = 0,32$ мкм. Анализ результатов с учетом способов обработки, приведенных в табл. 1, показал, что изготовление отверстий по шаблонам значительно эффективнее по сравнению с другими применяемыми способами.

Обработка технологичности форсунок (рис. 3)

по критерию полезности [3] показала, что здесь вне конкуренции применение комбинированной эрозионно-химической обработки каналов.

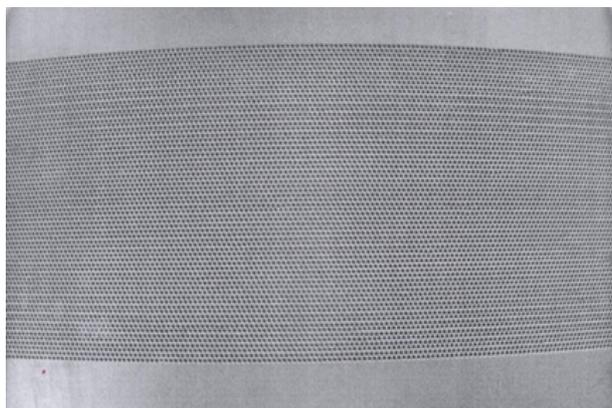


Рис. 2. Фрагмент сетки с многогранными отверстиями для изготовления фильтров для тонкой очистки жидких газов



Рис. 3. Разрез (вверху) и общий вид (внизу) форсунки с центральным каналом, имеющим геометрию сопла Лавалья

Анализ вариантов технологических процессов, используемых при изготовлении каналов в форсунках, применяемых для подачи горючих жидкостей, в том числе жидкого водорода, по критерию полезности послужил основанием для обоснования эффективности выбора наиболее технологичного комбинированного эрозионно-химического способа прошивки центрального отверстия (см. рис. 3) с профилем проточной части в форме сопла Лавалья [5]. Этот вариант оказался наиболее производительным и позволил повысить ресурс

форсунок за счет ускорения потока горючей смеси, сдвигающей факел пламени от среза сопла форсунки.

Заключение

Приведенные критерии и методология использования принципа полезности для обработки производственной технологичности на этапе запуска новой наукоёмкой техники позволяет повысить эксплуатационные характеристики изделий при оптимизации затрат на их изготовление. Приведенные материалы могут использоваться при освоении продукции различных отраслей машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
2. Смоленцев, В.П. Инновационные технологии комбинированных методов обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2017. – №7(...). – С. 15-19.
3. Смоленцев, В.П., Сафонов, С.В. Область рационального использования нетрадиционных технологий для повышения качества и надежности изделий // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – № 4. – С. 12-18.
4. S.V. Safonov, V.P. Smolentsev, A.V. Mandrykin The methodology of manufacturability testing in launching high-tech products of aerospace engineering into production // Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.,2019>, 176 2214-7853/ 2019.
5. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

REFERENCES

1. Beziyazychny, V.F. Similarity Method in Engineering Technique. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.
2. Smolentsev V.P. Innovation technologies of combined processing methods // *Science Intensive Technologies In Mechanical Engineering*. – 2017. – No.7 (...). – pp. 15-19.
3. Smolentsev, V.P., Safonov, S.V. Field of rational use of alternative technologies for parts quality and reliability increase // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2019. – No.4. – pp. 12-18.
4. S.V. Safonov, V.P. Smolentsev, A.V. Mandrykin The methodology of manufacturability testing in launching high-tech products of aerospace engineering into production // Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.,2019>, 176 2214-7853/ 2019
5. Smolentsev, E.V. *Design of Electric and Combined Methods of Processing*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 511.

Рецензент д.т.н. А.В. Кузовкин