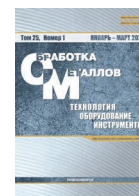




## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Методика критериального анализа мультивариантных систем

Дмитрий Лобанов<sup>а, \*</sup>, Олеся Рафанова<sup>б</sup>

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru), <sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0560-4730>,  [olesya-karamaeva89@mail.ru](mailto:olesya-karamaeva89@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

##### История статьи:

Поступила: 05 декабря 2022  
Рецензирование: 14 января 2023  
Принята к печати: 25 января 2023  
Доступно онлайн: 15 марта 2023

##### Ключевые слова:

Анализ  
Сравнение  
Мультивариантные системы  
Эффективность производства  
Организация производства  
Автоматизация  
Качество

##### Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Тенденции развития и применения современных машиностроительных систем так или иначе создают проблему анализа и выбора в случае наличия альтернатив объектов или же при большом количестве критериев сравнения – показателей эффективности объектов или систем. Основные трудности оптимизации решения проектирования производственных систем зависят от сложных технологических задач – большого количества влияющих факторов и отсутствия закономерностей. Выбор эффективных объектов и систем – зачастую сложный и многокритериальный процесс, требующий больших затрат времени и, как следствие, снижающий эффективность организации подготовки производства. В связи с этим для подготовки и принятия различных по сложности технико-экономических решений в условиях производства необходим системный подход с использованием наиболее рациональных форм и методов организации производства. **Цель работы** – создание обобщенной методики критериального анализа мультивариантных систем. **Методика исследований.** Предложена методика, направленная на повышение эффективности организации подготовки производства за счет обоснованного выбора из большого числа вариантов. Выбор рационального варианта решения основывается на ранжировании показателей по приоритетности на момент принятия обоснованного решения конкретной ситуации и вида рассматриваемого объекта и системы. Показатели могут быть переменными с учетом специфики производства. **Результаты и их обсуждение.** В качестве примера практического применения предлагаемой методики проведем сравнительный анализ процесса лезвийной обработки полимерного композиционного материала стеклотекстолит СТЭФ-1 сборной фрезой, оснащенной различными инструментальными материалами. В качестве параметров сравнения взяты период технологической стойкости инструмента, производительность лезвийной обработки и приведенные затраты при реализации лезвийной обработки. По результатам сравнительного мультикритериального анализа, проведенного по представленной методике, следует вывод, что приоритетом в рассматриваемой системе с оговоренными параметрами реализации технологии является конструкция, оснащенная сплавом ВКЗМ, у которой наблюдается наибольшее значение весового критериального коэффициента. По результатам анализа близким по рациональности является инструмент, оснащенный сплавом марки ВК6ОМ, что позволяет рекомендовать его в качестве аналога при выборе. Область предполагаемого применения методики видится при необходимости анализа сложных мультивариантных систем/объектов. В качестве объектов/систем могут выступать как варианты научных решений при различных условиях сопоставимости, так и конструкторские, технологические решения, конструкционные и инструментальные материалы на стадии выбора при конструкторской и технологической подготовке производства, варианты алгоритма реализации систем. Параметрами сравнения могут быть физико-механические, технологические, эксплуатационные свойства, технико-экономические и качественные показатели, специфические характеристики и параметры. Предложенная методика позволит сократить время на принятие новых решений при варьируемых условиях производства. Использование методики при известных и четко определенных параметрах, характеризующих мультивариантные системы, позволяет алгоритмизировать, а в последующем и автоматизировать процесс организационно-технологической подготовки производства.

**Для цитирования:** Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Методика критериального анализа мультивариантных систем // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 85–97. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97.

### Введение

Тенденции развития и применения современных машиностроительных систем так или иначе создают проблему анализа и выбора в случае наличия альтернатив объектов или же при большом количестве критериев сравнения – показателей эффективности объектов или систем [1–10].

#### \*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент  
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
пр. Московский, 15,  
428015, г. Чебоксары, Россия  
Тел.: +7-908-303-47-45, e-mail: [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru)

В связи с этим подготовительная стадия любой производственной системы имеет важнейшее значение для любого предприятия. Конкурентоспособность напрямую зависит от подходов к процессу функционирования производства как к обобщенной производственной системе, имеющей множество целевых функций, зависящих от различных факторов [11, 12]. Начальную оценку эффективности производственной системы необходимо произвести на стадии подготовки для дальнейшего принятия долгосрочных решений, которые, в свою очередь, напрямую влияют на размеры капиталовложений системы в целом. Основные сложности выбора оптимального варианта проектирования производственных систем зависят от сложных технологических задач – большого количества влияющих факторов и отсутствия закономерностей [13, 14].

Знание основ проектирования позволит выбрать наиболее рациональные варианты компоновки производственной системы и разработать алгоритмы управления для последующей автоматизации процесса подготовки и проектирования производственных систем с использованием математических методов. При проектировании производственной системы необходимо иметь базу данных с информацией, в которой будут необходимые данные о предметной области и которые будут представлять существующие связи и/или закономерности между элементами и свойствами объектов сравнения [15–21]. Наличие информации об объектах анализа позволит принимать обоснованные решения, на основе которых возможно моделирование системы, ее прогнозирование и оптимизация.

Особую актуальность это приобретает на стадии организационной или технологической подготовки производства, когда необходимо в сжатые сроки сделать обоснованный выбор из большого числа вариантов.

При этом стремятся получить на выходе экономическую и технологическую эффективность производства. Выбор эффективных объектов и систем зачастую сложный и многокритериальный процесс, требующий больших затрат времени и, как следствие, снижающий эффективность организации подготовки производства [22–26]. В реальных условиях индивидуально определяются признаки, по которым производится оцен-

ка, и выбирается оптимальный вариант решения. Учитывая, что показатели стремятся привести к экстремуму (повышению или понижению), а при обеспечении гибкости производства, с учетом специфики, когда ранжирование показателей по приоритетности может быть переменным, процесс критериального анализа еще усложняется. Целью работы является создание обобщенной методики критериального анализа мультивариантных систем, смысл которой заключается в выявлении параметров, которые наиболее важны в реальных условиях именно на момент принятия обоснованного решения, с последующим анализом по приоритетным параметрам.

Результат анализа системы должен быть направлен на обеспечение эффективности рассматриваемой системы в условиях принятых ограничений и приоритетов. Последовательность выбора оптимального варианта производственной системы определяется экономическими, техническими и организационными задачами. При проектировании необходимо понимать, что любые технологические решения могут и должны изменяться, регулироваться в ходе их реализации на исполнительном этапе производства. Сложность и трудоемкость всего процесса проектирования мультивариантных систем заключается в сопоставлении эффективности и рентабельности нескольких вариантов. При этом сравнение равноценных вариантов необходимо производить на каждом этапе проектирования. Степень углубленности и структура производственной системы зависят от типа производства.

## Методика исследований

Для формализации задачи воспользуемся основами матричного анализа.

Обозначим через  $O_i$  объекты или системы сравнения, где  $i$  меняется от 1 до  $m$ , а  $m$  – количество объектов/систем сравнения. Параметры, характеризующие системы сравнения обозначим как  $P_j$ , где  $j$  меняется от 1 до  $n$ , а  $n$  – количество параметров, выбранных для сравнительного анализа. Таким образом,  $O_i = O_1, O_2, \dots, O_m$ ;  $P_j = P_1, P_2, \dots, P_n$ ;  $P \in O$ .

Так как критерии, как правило, имеют каждый свою размерность, то для удобства расчета матрицы с учетом приоритета минимального или максимального значения критерия предста-

вим элементы матрицы в виде кодированного безразмерного значения  $a_{ij}$ . Для кодирования необходимо ранжировать показатели  $P_j$  на те, которые предпочтительны в максимальном значении (требуется повышение) и те, которые предпочтительны в минимальном значении (требуется снижение).

Если для заданных условий сопоставимости максимальное значение критерия является более предпочтительным, то и элемент матрицы  $a_{ij}$  в кодированном виде примет безразмерное численное значение, равное модулю величины критерия  $a_{ij} = |P_{ij}|$ . В случае предпочтительности минимального значения критерия сравнения принимаем  $a_{ij}$  как безразмерное численное значение, равное модулю обратной величины критерия:  $a_{ij} = \left| \frac{1}{P_{ij}} \right|$ .

Для реализации методики составим матрицу смежности  $M(a_{ij})$ , строки которой будут отражать объекты или системы сравнения  $O_i$ , а столбцы – критерии  $P_j$ , характеризующие эти объекты или системы сравнения:

$$M(a_{ij}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & \dots & P_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \\ \dots \\ O_m \end{matrix} & \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Рекомендуемое построение матрицы позволит произвести сравнение, анализ и рациональный выбор объекта или системы с учетом проведенного ранее ранжирования параметров.

В дальнейшем критерии могут быть представлены как дискретными численными значениями, так и функциональными зависимостями  $P = f(k_z)$  от параметров  $k = \{k_1, k_2, \dots, k_z\}$ , которые к моменту принятия решений принимают конкретные значения в зависимости от выбранных пользователями ограничений, отвечающих условиям сопоставимости, характерным для организации производства. Выбор количества и состава параметров зависит от конкретной ситуации и вида рассматриваемого объекта или системы.

Следует отметить, что чем больше параметров, характеризующих анализируемые объекты, будет принято при расчете, тем обоснованнее будет произведен выбор рационального варианта решения.

Сформированная по приведенной выше методике матрица смежности позволяет произвести вычисление весового критериального коэффициента  $q_i$  для каждого  $i$ -го объекта или системы сравнения в отдельности:

$$q_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}. \quad (2)$$

Полученные в результате расчета значения формируются в результирующий вектор:

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_i \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Результирующий вектор позволяет наглядно судить о рациональности каждого из объектов сравнения, где максимальное значение  $q_i$  свидетельствует о большей приоритетности решения.

## Результаты и их обсуждение

В качестве примера практического применения предлагаемой методики проведем сравнительный анализ процесса лезвийной обработки полимерного композиционного материала стеклотекстолит СТЭФ-1 сборной фрезой, оснащенной различными инструментальными материалами.

Стеклотекстолит СТЭФ-1 представляет собой слоистый материал на основе стеклоткани, пропитанной эпоксифенольным связующим. Лезвийная обработка полимерных композитов, как правило, вызывает трудности в обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей и физико-механических свойств деталей [27–32]. Это связано со структурой полимерных композитов и спецификой их поведения при механическом воздействии режущего лезвия. Процесс резания композитов отличается от резания металлических материалов, и применить общепринятые подходы при выборе лезвийного инструмента не всегда представляется возможным [27, 29].

При обработке резанием композиционных полимерных материалов инструментальные материалы должны обладать специфическими физико-механическими свойствами, высокой износостойкостью и твердостью, что обеспечивает работоспособность инструмента и увеличивает эффективность производства [33, 34].

Для проведения многокритериального анализа по предлагаемой методике приняты следующие допущения и ограничения. Конструкции инструментов (объекты сравнения  $O_i$ ) имеют аналогичные конструктивные и геометрические параметры, выбранные на основе ранее проведенных исследований [27, 29, 33, 34], но отличаются материалом режущей части, оснащены следующими инструментальными материалами: BK2, BK8, BK15, BK3M, BK6OM, T5K10.

Согласно ранее проведенным исследованиям для совершенствования условий и снижения сроков организационной и технологической подготовки режущего инструмента при реализации технологии обработки изделий, достижения рациональной работоспособности инструмента в совокупности с обеспечением требуемого качества обработанной поверхности и интенсификации производительности обработки полимерных композиционных материалов рекомендуется применять:

1) высокопрочные инструментальные материалы для оснащения режущей части инструмента. Варианты инструментального материала указаны выше;

2) режимы резания при обработке композиционных материалов: подача на зуб  $S = 0,15 \dots 0,17$  мм/зуб,  $t = 0,5 \dots 0,6$  мм, обороты  $n = 6\,000$  мин<sup>-1</sup>, при данных значениях достигается максимальная (в пределах, которые допускается технологическим оборудованием) скорость резания;

3) геометрические параметры инструмента устанавливаются в пределах: передний угол  $\gamma^\circ = 15 \dots 20^\circ$ , задний угол  $\alpha^\circ = 10 \dots 15^\circ$ , угол заострения  $\beta^\circ = 55 \dots 60^\circ$ .

Стоимость твердосплавных пластин для фрез была получена от Кировоградского завода твердых сплавов. Стоимость фрез укрупненно рассчитана с учетом затрат на изготовление в лабораторных условиях.

Физико-механические свойства инструментальных материалов взяты справочно.

Исходные данные для анализа представлены в табл. 1.

Рациональный выбор инструментального материала для заданных условий предприятия на данный момент является обязательным этапом организации подготовки производства. В качестве критериев эффективности технологии лезвийной обработки полимерного композита выделим: работоспособность инструмента, производительность и экономичность.

Период стойкости является показателем работоспособности режущего инструмента. Определение этой величины зависит от достоверных значений для таких параметров технологического процесса, как технологические режимы резания, инструментальный материал, свойства материала заготовки, геометрические параметры инструмента. Принимая в качестве исходных данных результаты стойкостных испытаний инструмента при заданном сочетании материала заготовки и инструментального материала (экспериментальная система), возможно определить расчетную (прогнозируемую) стойкость режущего инструмента при любых иных сочетаниях материалов (расчетная система) в следующем виде [27]:

$$T = T_e K_T, \text{ мин}$$

где  $T_e$  – экспериментальный период стойкости при известном сочетании материалов, мин;  $K_T$  – коэффициент изменения периода стойкости, который зависит от сочетания в инструментальной системе физико-механических и эксплуатационных свойств материалов инструмента и заготовки, исследуемых (прогнозируемых) и полученных экспериментально ранее.

Полный расчет эффективности производительности и работоспособности инструмента производится по разработанной методике [27, 29]. При определении критерия экономичности необходимо выявить производственные затраты. Расчет экономического эффекта производится по разработанной методике [35].

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Рассмотрим условие производства, где необходима высокая работоспособность режущего инструмента и повышенная производительность обработки, и при этом нужно снизить производственные затраты. Следовательно,



Таблица 1

Table 1

**Конструктивные параметры сравниваемых фрез**  
**Form factors of compared cutters**

Параметры	Значение параметра					
Код конструкции	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$
Материал режущей части	BK2	BK8	BK15	BK3M	BK6OM	T5K10
Диаметр фрезы, мм	250					
Стоимость фрезы, руб.	4 500					
Количество зубьев, шт.	4					
Число смен режущих элементов	50					
Ширина резания, мм	10					
Передний угол, $\gamma^\circ$	20					
Задний угол, $\alpha^\circ$	12					
Время затачивания одного режущего элемента, мин	1,5					
Режимы резания	$S = 0,15 \text{ мм/зуб}, t = 0,5 \text{ мм}, n = 6\,000 \text{ мин}^{-1}$					
Предел прочности на сжатие, МПа	3 900	3 910	2 800	4 700	4 900	3 000
Твердость, HRA	91,5	88,0	86,0	91,5	90,5	88,5
Модуль упругости, ГПа	645	598	559	638	632	549
Цена одного режущего элемента, руб.	63	66	54	95	95	45

Таблица 2

Table 2

**Результаты расчета критериев производства**  
**Production criteria calculation results**

Параметры	Значение параметра					
Код конструкции	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$
Период стойкости $T$ , мин	61,26	39,29	22,65	76	71,67	34,05
Производительность $P$ , $10^{-5} \text{ м}^3/\text{мин}$	16,15	10,36	5,97	20,04	18,9	8,89
Приведенные затраты, $PZ$ , $10^{-3} \text{ руб}/\text{мм}^3$	6,26	9,76	16,93	5,098	5,41	12,74
Высота микронеровностей, $R_z$ мкм	23					

работоспособность и производительность будут иметь безразмерное численное значение, равное модулю величины критерия  $a_{ij} = |P_{ij}|$ , а производственные затраты – безразмерное численное значение, равное модулю обратной

величины критерия:  $a_{ij} = \left| \frac{1}{P_{ij}} \right|$ . После проведения ранжирования критериев строим матрицу смежности

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & T & P & R_z & PZ \\ Q_1 & 61,26 & 16,15 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{6,26} \\ Q_2 & 39,29 & 10,36 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{9,76} \\ Q_3 & 22,65 & 5,97 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{16,93} \\ Q_4 & 76 & 20,04 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{5,098} \\ Q_5 & 71,67 & 18,9 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{5,41} \\ Q_6 & 34,05 & 8,98 \cdot 10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{12,74} \end{pmatrix}.$$

Получим значения:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & T & P & R_z & PZ \\ Q_1 & 61,26 & 16,15 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,16 \\ Q_2 & 39,29 & 10,36 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,10 \\ Q_3 & 22,65 & 5,97 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,06 \\ Q_4 & 76 & 20,04 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,20 \\ Q_5 & 71,67 & 18,9 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,18 \\ Q_6 & 34,05 & 8,98 \cdot 10^{-5} & 0,043 & 0,08 \end{pmatrix}.$$

Так как значение шероховатости должно быть одинаковым для каждого объекта, то его значением можно пренебречь. Для вычисления весового критериального коэффициента  $q_i$  для каждого  $i$ -го объекта сравнения в отдельности производим вычисления выбранного критерия по формуле (2):

$$q_1 = 61,26 + 16,15 \cdot 10^{-5} + 0,16 = 77,57 \cdot 10^{-5},$$

$$q_2 = 39,29 + 10,36 \cdot 10^{-5} + 0,10 = 49,75 \cdot 10^{-5},$$

$$q_3 = 22,65 + 5,97 \cdot 10^{-5} + 0,06 = 28,68 \cdot 10^{-5},$$

$$q_4 = 76 + 20,04 \cdot 10^{-5} + 0,20 = 96,22 \cdot 10^{-5},$$

$$q_5 = 71,67 + 18,9 \cdot 10^{-5} + 0,18 = 90,75 \cdot 10^{-5},$$

$$q_6 = 34,05 + 8,98 \cdot 10^{-5} + 0,08 = 43,1 \cdot 10^{-5}.$$

Полученные в результате расчета значения весового критериального коэффициента формируем в результирующий вектор для анализируемых конструкций режущего инструмента:

$$q = \begin{pmatrix} 77,57 \cdot 10^{-5} \\ 49,75 \cdot 10^{-5} \\ 28,68 \cdot 10^{-5} \\ 96,22 \cdot 10^{-5} \\ 90,75 \cdot 10^{-5} \\ 43,10 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, по результатам сравнительного мультикритериального анализа следует вывод о приоритете в рассматриваемой системе с оговоренными параметрами реализации технологии конструкции  $O_4$ , оснащенной сплавом ВКЗМ, у которой наблюдается наибольшее значение коэффициента  $q$ . При составлении матрицы смежности уже наблюдалось превосходство этой конструкции над аналогичными конструкциями режущих инструментов по выбранным критериям. Это говорит еще и о наглядности выбранной методики. По результатам анализа близким по рациональности является инструмент, оснащенный сплавом марки ВК6ОМ, что позволяет рекомендовать его в качестве аналога при выборе.

Представленный пример рациональности фрезерования композиционных материалов ограничен только выбором материалов режущей части инструмента. В реальных же условиях производства технологический процесс содержит большее количество параметров и критериев, которые необходимо ранжировать исходя из условий производства.

## Выводы

Данная методика обеспечит возможность создания производственных объектов или систем на базе существующих путем проведения различных мероприятий, использующих временные организационные связи без трудоемких материальных перестроек. Это новый подход к процессу формирования производственной системы с требуемыми свойствами. Процесс выработки проектного решения состоит из последовательных действий по выдвижению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и соответственно выбора. Задача по выбору оптимального варианта решается за счет использования общих знаний проблемной среды и внутрен-

ней модели любой системы и осуществления направленного поиска с исключением из рассмотрения заведомо неприемлемых решений.

1. Область предполагаемого применения методики видится при необходимости анализа сложных мультивариантных систем/объектов.

2. В качестве объектов/систем могут быть как варианты научных решений при различных условиях сопоставимости, так и конструкторские, технологические решения, конструкционные и инструментальные материалы на стадии выбора при конструкторской и технологической подготовке производства, варианты алгоритма реализации систем.

3. Параметрами сравнения могут быть физико-механические, технологические, эксплуатационные свойства, технико-экономические и качественные показатели, специфические характеристики и параметры.

4. Предложенная методика позволит сократить время на принятие новых решений при варьируемых условиях производства и определять корреляцию этапов проектирования.

Использование методики при известных и четко определенных параметрах, характеризующих мультивариантные системы, позволяет алгоритмизировать, а в последующем и автоматизировать процесс организационно-технологической подготовки производства. Это значительно сократит время и повысит качество процесса многокритериального сравнительного анализа систем и принятия обоснованных решений (научных или производственных) при варьируемых условиях сопоставимости.

### Список литературы

1. Обеспечение качества при абразивной обработке: вопросы теории и практики / Т.А. Аскалонова, А.М. Иконников, С.Л. Леонов, Ю.К. Новоселов, А.А. Ситников, Е.Ю. Татаркин; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2016. – 219 с. – ISBN 978-5-7568-1170-4.

2. Песин М.В., Макаров В.Ф., Мокроносов Е.Д. Методы проектирования и оптимизации технологического процесса упрочнения деталей нефтегазового назначения // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – № 6 (18). – С. 18–19.

3. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Методика оценки колебаний системы при торцовом фрезеровании портативным оборудованием // Спра-

вочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 7 (208). – С. 46–49. – DOI: 10.14489/hb.2014.07.pp.046-049.

4. Борисов М.А., Лимонов С.Е. Анализ и совершенствование роботизированного оборудования для исследований в области автоматизации производственных процессов // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 апреля 2022 г. – Севастополь, 2022. – С. 112–115.

5. Кудряшов Е.А., Никонов А.М. Обработка деталей из разнородных конструкционных материалов инструментом из композитов // СТИН. – 2008. – № 12. – С. 26–28.

6. Татаркин Е.Ю., Иконников А.М., Шрайнер Т.А. Автоматизация выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов. – Кемерово, 2015. – С. 196–201.

7. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования / В.А. Носенко, Н.Ф. Ларионов, Н.И. Егоров, М.П. Волков // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 17–21.

8. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

9. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity / O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov, N.M. Bobrovskij, I.N. Bobrovskij, P.A. Melnikov // 13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 2016. – P. 241–244. – DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802265.

10. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.

11. Татаркин Е.Ю., Иконников А.М. Функционально-стоимостный анализ технологических процессов изготовления деталей // Инновации в машиностроении: труды 4-й Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 02–04 октября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – С. 386–387.

12. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов, Е.А. Сукочева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 6 (675). – С. 73–81.

13. Скиба В.Ю. Обеспечение требуемого характера распределения остаточных напряжений при упрочнении высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2007. – № 2 (35). – С. 25–27.
14. Малюченков А.В., Кожевников А.В. Организация подготовки производства новых изделий как основа инновационного развития предприятия // *Инновационный вестник Регион*. – 2009. – № 1. – С. 14–21.
15. Амелин С.В. Организация производства в машиностроении в условиях цифровой трансформации // *Организатор производства*. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 17–23.
16. Сравнительный многокритериальный анализ сложных технических и социальных систем в экономико-управленческом аспекте / Д.В. Панов, В.В. Малышев, С.А. Пиявский, Д.В. Ковков // *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)*. – 2016. – Т. 7, № 2 (26). – С. 74–83. – DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.2.74.83.
17. Интегральная обработка как эффективное направление решения задачи перехода к ресурсосберегающим технологиям / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // *Инновационная деятельность*. – 2010. – № 1 (10). – С. 66–69.
18. Методика комплексного оценивания технического состояния сложных технических систем, реализуемая на основе применения теории линейных преобразований матриц / Р. Катюха, С. Багрецов, А. Бабишкин, В. Королев // *Компоненты и технологии*. – 2016. – № 9 (182). – С. 122–123.
19. Родионова В.Н., Луценко М.С. Организационные основы обеспечения гибкости производства в условиях развития инновационной деятельности // *Организатор производства*. – 2012. – № 4 (55). – С. 17–22.
20. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, iss. 9. – P. 1354. – DOI: 10.3390/met11091354.
21. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, iss. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.
22. Зареченский А.М. Организация производства на высокотехнологичных предприятиях в условиях цифровой экономики // *СТИН*. – 2021. – № 11. – С. 10–12.
23. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, А.А. Харченко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.
24. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на основе синхронного подхода / В.Ф. Макаров, В.Р. Туктамышев, С.В. Масленков, Я.А. Катаев, И.И. Койнов, О.И. Трепезаева // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2014. – № 9 (39). – С. 35–39.
25. Кисель А.Г., Реченко Д.С. Оценка технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при лезвийной обработке // *Механика XXI века*. – 2013. – № 12. – С. 160–161.
26. Рошупкин С.И., Колесов А.Г., Тараховский А.Ю. Анализ технологии и оборудования для изготовления металлополимерных филаментов для 3D-печати по технологии Fused deposition modeling (FDM) // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. – 2021. – № 7. – С. 25–27. – DOI: 10.26160/2541-8637-2021-7-25-27.
27. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2012. – 296 с. – ISBN 978-5-94178-347-2.
28. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. – 2015. – № 22. – С. 14–22.
29. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Технология механической обработки композиционных материалов. – Братск: Изд-во Брат. гос. ун-та, 2017. – 224 с.
30. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 30–41.
31. Лобанов Д.В., Владимирова Н.А., Рафанова О.С. Особенности процесса лезвийной обработки полимерных композиционных материалов и формообразования режущего инструмента // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 14–15 декабря 2020 г. – Пермь, 2021. – С. 141–144.*
32. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов / В.Ф. Макаров, И.И. Койнов, Р.С. Абзаев, В.В. Ши-



ринкин, А.Е. Мешкас // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 12 (66). – С. 20–27.

33. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Оптимизация выбора режущего инструмента на основе методов сравнительного анализа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5-2 (283). – С. 23–30.

34. Лобанов Д., Янюшкин А., Рычков Д. Автоматизированная система создания баз данных и

многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // САПР и графика. – 2011. – № 3 (173). – С. 71–73.

35. Лобанов Д.В., Рафанова О.С., Владимиров Н.А. Оценка экономичности лезвийной обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8, № 3–4. – С. 30–35.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Methodology for criteria analysis of multivariant system

Dmitry Lobanov<sup>a, \*</sup>, Olesya Rafanova<sup>b</sup>

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0560-4730>, [olesya-karamaeva89@mail.ru](mailto:olesya-karamaeva89@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 December 2022

Revised: 14 January 2023

Accepted: 25 January 2023

Available online: 15 March 2023

#### Keywords:

Analysis

Comparison

Multivariate systems

Production efficiency

Production organization

Automation

Quality

#### Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

### ABSTRACT

**Introduction.** Trends in the development and application of modern machine-building systems somehow create the problem of analysis and choice in the presence of alternative objects, or with a large number of comparison criteria - indicators of the effectiveness of objects or systems. The main difficulties in optimizing the solution for designing production systems depend on complex technological problems: a large number of influencing factors and the absence of patterns. The choice of effective objects and systems is often a complex and multi-criteria process that requires a lot of time and, as a result, reduces the efficiency of the organization of production preparation. In this regard, for the preparation and adoption of technical and economic decisions of various complexity in production conditions, a systematic approach is required using the most rational forms and methods of organizing production. **The purpose of the work:** to create a generalized methodology for the criteria analysis of multivariant systems. **The methods of investigation.** A methodology is proposed aimed at improving the efficiency of the organization of pre-production due to a reasonable choice from a large number of options. The choice of a rational solution option is based on the ranking of indicators by priority at the time of making a reasonable decision in a specific situation and the type of object and system under consideration. Indicators can be variable, taking into account the specifics of production. **Results and Discussion.** A comparative analysis of the process of edge cutting machining of the *STEF-1* fiber-glass polymer composite material with an interlocking side mill carrying various insert materials is conducted as an example of the practical application of the proposed methodology. As comparison parameters, the period of technological tool life, cutting performance and reduced costs in the implementation of cutting are taken. According to the results of a comparative multi-criteria analysis carried out according to the presented method, it follows that the priority in the system under consideration with the specified parameters for the implementation of the technology is the tool equipped with *WC-3Co* alloy inserts, which has the highest value of the weight criteria coefficient. According to the results of the analysis, a tool equipped with *WC-2TaC-6Co* alloy inserts is close in rationality, which allows recommending it as an analogue when choosing. The scope of the proposed application of the methodology is seen if it is necessary to analyze complex multivariant systems/objects. The objects/systems can be both variants of scientific solutions under various conditions of comparability, as well as design, technological solutions, structural and instrumental materials at the selection stage in the design and technological preparation of production, variants of the system implementation algorithm. The comparison parameters can be physical, mechanical, technological, operational properties; technical, economic and quality indicators; specific characteristics and parameters. The proposed technique will reduce the time for making new decisions under varying production conditions. The use of the methodology with known and well-defined parameters characterizing multivariant systems makes it possible to algorithmize, and subsequently automate, the process of organizational and technological preparation of production.

**For citation:** Lobanov D.V., Rafanova O.S. Methodology for criteria analysis of multivariant system. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 85–97. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97. (In Russian).

### References

1. Askalonova T.A., Ikonnikov A.M., Leonov S.L., Novoselov Yu.K., Sitnikov A.A., Tatarkin E. Yu. *Obespechenie kachestva pri abrazivnoi obrabotke: voprosy teorii i praktiki* [Quality assembly for abrasive processing: theories and practice issues]. Barnaul, Polzunov Altai State Technical University Publ., 2016. 219 p. ISBN 978-5-7568-1170-4.

#### \* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Professor  
 I.N. Ulianov Chuvash State University,  
 15 Moskovsky Prospekt,  
 428015, Cheboksary, Russian Federation  
 Tel.: + 7-908-303-47-45, e-mail: [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru)

2. Pesin M.V., Makarov V.F., Mokronosov E.D. Metody proektirovaniya i optimizatsii tekhnologicheskogo protsessa uprochneniya detalei neftegazovogo naznacheniya [Design and optimization methods of technological processes hardening of the products of oil-and-gas purpose]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil Gas*, 2011, no. 6 (18), pp. 18–19.

3. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kuznetsov S.F. Metodika otsenki kolebanii sistemy pri tortsovom frezerovanii portativnym oborudovaniem [Assessment method of mechanical system oscillations for portable equipment face milling process]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*, 2014, no. 7 (208), pp. 46–49. DOI: 10.14489/hb.2014.07.pp.046-049.

4. Borisov M.A., Limonov S.E. [Analysis and improvement of robotic equipment for research in field of automation of production processes]. *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy* [Modern technologies: problems and prospects]. A collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference for graduate students, students and young scientists. Sevastopol, 2022, pp. 112–115. (In Russian).

5. Kudryashov E.A., Nikonov A.M. Obrabotka detalei iz raznorodnykh konstruksionnykh materialov instrumentom iz kompozitov [Processing parts from heterogeneous structural materials with a tool from composites]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2008, no. 12, pp. 26–28. (In Russian).

6. Tatarkin E.Yu., Ikonnikov A.M., Schrayner T.A. [Automated selection tool for operations magnetic abrasive machining of complex surfaces]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash-2015)* [Innovation in mechanical engineering (ISPCIME-2015)]. VII International Scientific and Practical Conference. Materials. Kemerovo, 2015, pp. 196–201. (In Russian).

7. Nosenko V.A., Larionov N.F., Egorov N.I., Volkov M.P. Vybor kharakteristiki abrazivnogo instrumenta i SOZh dlya glubinnogo shlifovaniya [The choice of the characterization of abrasive tools and coolant for deep grinding]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1989, no. 5, pp. 17–21. (In Russian).

8. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdosti stali pri integratsii poverkhnostno-termicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotok [Increased surface microhardness of steel in the integration of surface-thermal and mechanical finishing treatments]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 187–192.

9. Zakharov O.V., Kochetkov A.V., Bobrovskij N.M., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity. *13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016)*: Proceedings: in 12 vols, Novosibirsk, 2016, pp. 241–244. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802265.

10. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskome oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.

11. Tatarkin E.Yu., Ikonnikov A.M. [Functional analysis of the technological processes of manufacturing parts]. *Innovatsii v mashinostroenii* [Works of the 4th International Scientific and Practical Conference “Innovation in mechanical engineering”]. Novosibirsk, 2013, pp. 386–387. (In Russian).

12. Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Sarazov A.V., Sukocheva E.A. Vybor optimal'nykh uslovii ploskogo shlifovaniya stal'nykh zagotovok [The determination of optimal conditions for flat grinding of steel workpieces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 6 (675), pp. 73–81.

13. Skeebe V.Yu. Obespechenie trebuemogo kharaktera raspredeleniya ostatochnykh napryazhenii pri uprochnenii vysokoenergeticheskim nagrevom tokami vysokoi chastoty [Providing the required character of the residual stress distribution for hardening high-energy high-frequency heating]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2007, no. 2 (35), pp. 25–27.

14. Malyuchenkov A.V., Kozhevnikov A.V. Organizatsiya podgotovki proizvodstva novykh izdelii kak osnova innovatsionnogo razvitiya predpriyatiya [Organization of preparation for the production of new products as a basis for innovative development of the enterprise]. *Innovatsionnyi vestnik Region = Innovative bulletin Region*, 2009, no. 1, pp. 14–21.

15. Amelin S.V. Organizatsiya proizvodstva v mashinostroenii v usloviyakh tsifrovoi transformatsii [Organization of production in mechanical engineering in conditions of digital transformation]. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 17–23.

16. Panov D.V., Malyshev V.V., Piyavskii S.A., Kovkov D.V. Sravnitel'nyi mnogokriterial'nyi analiz slozhnykh tekhnicheskikh i sotsial'nykh sistem v ekonomiko-upravlencheskom aspekte [Comparative multiobjective analysis of

complicated technical and social systems in terms of economics and management]. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie) = MIR (Modernization. Innovation. Research)*, 2016, vol. 7, no. 2 (26), pp. 74–83. DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.2.74.83.

17. Skeebe V.Yu., Ivancivskiy V.V., Zub N.P., Turevich S.V. Integral'naya obrabotka kak effektivnoe napravlenie resheniya zadachi perekhoda k resursoberegayushchim tekhnologiyam [Integrated processing as an effective direction of the decision problems of transition to alternative technologies]. *Innovatsionnaya deyatel'nost' = Innovation Activity*, 2010, no. 1 (10), pp. 66–69.

18. Katyukha R., Bagretsov S., Babishkin A., Korolev V. Metodika kompleksnogo otsenivaniya tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem, realizuemaya na osnove primeneniya teorii lineinykh preobrazovaniy matrits [The method of comprehensive evaluation of the technical condition of complex technical systems, implemented on the basis of application of the theory of linear matrix transformations]. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2016, no. 9 (182), pp. 122–123.

19. Rodionova V.N., Lutsenko M.S. Organizatsionnye osnovy obespecheniya gibkosti proizvodstva v usloviyakh razvitiya innovatsionnoi deyatel'nosti [Organizational basis for flexibility of production in the development of innovation]. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*, 2012, no. 4 (55), pp. 17–22.

20. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.

21. Efremkov E.A., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, iss. 5. DOI: 10.3390/app12010005.

22. Zarechenskii A.M. Organizatsiya proizvodstva na vysokotekhnologichnykh predpriyatiyakh v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Organization of production at high-tech enterprises in the conditions of digital economy]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2021, no. 11, pp. 10–12. (In Russian).

23. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analiz i sintez sistemy vibroizolyatsii shlifoval'nogo stanka s uchetom ekspluatatsionnoi nadezhnosti ee elementov [Analysis and synthesis of vibration isolation system of a grinding machine with account of the operational reliability of its elements]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

24. Makarov V.F., Tuktamyshev V.R., Maslenkov S.V., Kataev Ya.A., Koynov I.I., Trepezaeva O.I. Avtomatizatsiya konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na osnove sinkhronnogo podkhoda [Automation of design-engineering preparation of production on the base of synchronous approach]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 9 (39), pp. 35–39.

25. Kisel' A.G., Rechenko D.S. Otsenka tekhnologicheskoi effektivnosti smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostei pri lezviinoy obrabotke [Evaluation of the technological efficiency of lubricant-cooling liquids for blading]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*, 2013, no. 12, pp. 160–161.

26. Roshchupkin S.I., Kolesov A.G., Tarakhovskiy A.Yu. Analiz tekhnologii i oborudovaniya dlya izgotovleniya metallopolimernykh filamentov dlya 3D-pechati po tekhnologii Fused deposition modeling (FDM) [Analysis of technology and equipment for the production of metal-polymer filaments for 3d printing using fused deposition modeling (FDM) technology]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika = Mechatronics, Automation and Robotics*, 2021, no. 7, pp. 25–27. DOI: 10.26160/2541-8637-2021-7-25-27.

27. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Tekhnologiya instrumental'nogo obespecheniya proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh nemetallicheskih materialov [Tooling technology for the production of products from composite non-metallic materials]. Stary Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2012. 296 p.

28. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Issledovanie protsessov mekhanicheskoi obrabotki detalei aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki iz novykh kompozitsionnykh materialov [Research of processes of machining of details of aerospace technics from new composite materials]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New Materials and Technologies in Engineering*, 2015, no. 22, pp. 14–22.

29. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. Tekhnologiya mekhanicheskoi obrabotki kompozitsionnykh materialov [Technology of mechanical processing of composite materials]. Bratsk, Bratsk State University Publ., 2017. 224 p.

30. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Issledovanie problem mekhanicheskoi obrabotki sovremennykh vysokoprochnykh kompozitsionnykh materialov, ispol'zuemykh dlya proizvodstva detalei aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Research problems machining high strength composite materials used for the production of details of aviation and space-rocket technicians]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*



*politekhnikheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2015, no. 2, pp. 30–41.

31. Lobanov D.V., Vladimirova N.A., Rafanova O.S. [Features of the process blade processing polymeric composite materials and formation of the cutting tool]. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti* [Electrophysical Machining in Modern Industry: Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students], Perm, 2021, pp. 141–144. (In Russian).

32. Makarov V.F., Koinov I.I., Absaiev R.S., Shirinkin V.V., Meshkas A.E. Osobennosti diagnostiki protsessa rezaniya pri sverlenii kompozitsionnykh materialov [Peculiarities in diagnostics of cutting process at composite material drilling]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 12 (66), pp. 20–27.

33. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. Optimizatsiya vybora rezhushchego instrumenta na osnove metodov sravnitel'nogo analiza [Optimization of the choice of the cutting tool on the basis of methods of the comparative analysis]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2010, no. 5-2 (283), pp. 23–30.

34. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. Avtomatizirovannaya sistema sozdaniya baz dannykh i mnogokriterial'nogo sravnitel'nogo analiza konstruktssii sbornogo frezernogo instrumenta dlya obrabotki kompozitsionnykh materialov [Automated system for creating databases and multi-criteria comparative analysis of assembly milling tool structures for processing composite materials]. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*, 2011, no. 3 (173), pp. 71–73.

35. Lobanov D.V., Rafanova O.S., Vladimirova N.A. Otsenka ekonomichnosti lezviinoi obrabotki kompozitsionnykh materialov [Estimation of the economy of composite materials blade processing]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 2021, no. 3–4, pp. 30–35.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).