



Анализ и выбор композиционного материала для изготовления изделий на этапе конструкторской подготовки производства

Д.В. Лобанов^{1✉}, О.С. Рафанова²

^{1,2}Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Резюме. Цель – анализ и выбор новых материалов на этапе конструкторской подготовки производства изделий из композитов для замены общепринятых конструкционных металлов. В работе использовалась методика многокритериального анализа мультивариантных систем, основанная на матричном анализе. В качестве параметров сравнения, используемых в методике, могут выступать общеизвестные справочные данные, рекомендации по результатам научных исследований материалов, технико-экономические и качественные параметры методов формообразования изделий из этих материалов с учетом их специфических свойств. Проведен сравнительный анализ восьми разных материалов для конструирования изделий из полимерных композитов, ориентированный на замену общепринятых конструкционных материалов, при трех условиях сопоставимости. Первое условие – учет всех выбранных для сравнения физико-механических свойств материалов и их стоимости. При втором условии сопоставимости акцент сделан на пределы прочности материала, модуль упругости и стоимость. При третьем условии сопоставимости условия частично схожи со вторым условием, за исключением предела прочности на сжатие. Установлено, что наиболее рациональным композитом для конструирования изделий при первом и втором условии сопоставимости является базальтопластик, у которого наибольшее значение весового критериального коэффициента (q) в первом случае равно 0,3947, а во втором – 0,3955. При третьем условии сопоставимости оптимальным вариантом композиционного материала стал также углепластик, у которого достигнуто наибольшее значение $q = 0,3341$. Предложенная методика позволяет производить анализ и выбор не только материала для изготовления изделий, но и инструментального материала, режимов резания и геометрии инструмента с учетом накопленной в результате эмпирических исследований базы знаний. Произведена апробация разработанной методики при трех условиях сопоставимости. В результате проведенных теоретических исследований установлено, что применение разработанной методики может повысить эффективность подготовки производства в 2–3 раза (в зависимости от сложности оцениваемой системы).

Ключевые слова: подготовка производства, композиционные материалы, сравнительный анализ, свойства материалов, выбор, мультивариантная система

Для цитирования: Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Анализ и выбор композиционного материала для изготовления изделий на этапе конструкторской подготовки производства // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 214–223. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-214-223>. EDN: POBIKI.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Analysis and selection of composite material for the manufacture of products during the design preparation stage

Dmitry V. Lobanov^{1✉}, Olesya S. Rafanova²

^{1,2}I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Abstract. In this article, we set out to analyse and select new materials at the design preparation stage for the manufacture of composite products to replace conventional structural metals. In the study, a multi-criteria analysis of multivariate systems based on matrix analysis was used. For comparative examination, the well-known reference data, recommendations based on the scientific research of materials, as well as technical, economic and qualitative data of forming methods for these materials, were used, taking into account their specific properties. A comparative analysis was carried out for eight different materials used for the design of polymer composite products, aiming to replace conventional structural materials under three comparability conditions. The first condition considers all selected physical and mechanical properties of the materials and their costs. The second condition emphasises the

ultimate strength of the material, its elastic modulus and cost. The third condition is partially similar to the second condition, with the exception of the compressive strength. It was established that the most rational composite for the product design under the first and second conditions is a basalt fibre-reinforced polymer, with the highest weight criterion coefficient (q) of 0.3947 in the first case and 0.3955 in the second case. For the third condition of comparability, carbon fibre was found to be the optimal composite material with the highest q value of 0.3341. The methodology allows product materials, tool materials, cutting regimes and tool geometry to be analysed and selected based on the accumulated knowledge base derived from empirical research. The developed methodology was tested under the three comparability conditions. Theoretical studies showed that the use of the methodology could increase the efficiency of pre-production by 2–3 times, depending on the complexity of the evaluated system.

Keywords: production preparation, composite materials, comparative analysis, properties of materials, selection, multivariate system

For citation: Lobanov D.V., Rafanova O.S. Analysis and selection of composite material for the manufacture of products during the design preparation stage. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):213-223. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-214-223>. EDN: POBIKI.

ВВЕДЕНИЕ

Предъявляемые к различным изделиям требования в зависимости от условий эксплуатации постоянно изменяются. Например, прогрессивный материал должен обладать противоречивыми, на первый взгляд, характеристиками: высокими прочностными свойствами в сочетании с малой плотностью и уменьшением массы готового изделия. В связи с этим увеличивается доля создания и использования наноматериалов, керамики, дисперсных и композиционных материалов в машиностроении, авиастроении, судостроении, военной индустрии и медицине. Новые материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с известными традиционными материалами, но могут быть более дорогостоящими и сложными в производстве [1–5]. Целесообразность применения новых материалов для изготовления изделий возможно определить, только оценив комплексно их параметры, стоимость, доступность и возможности обработки.

Как известно, композиты – это материалы, состоящие из двух или более компонентов, объединенных между собой различными способами в монолитное изделие, которые способны сохранить свои индивидуальные особенности³ [6, 7]. Как правило, композиционные материалы состоят из матрицы и армирующего компонента. Матрица является составляющим элементом, обладающим постоянством по всему объему, компонент же является прерывным и разделенным в этом объеме упрочняющим элементом. Номенклатура композиционных материалов очень разнообразная и зависит от материала матрицы:

- композиты с полимерной матрицей (ПКМ);
- металлической матрицей (МКМ);
- керамической матрицей (ККМ);
- углеродной матрицей (ККМ).

По структурным характеристикам материала армирующего компонента композиты могут быть волокнистыми, слоистыми, дисперсно-упрочненными, упрочненными частицами, нанокompозитами.

В настоящее время известно множество композитов, которые имеют свои уникальные свойства и области применения [6, 7]. Сдерживание применения данных материалов на производстве зачастую идет за счет недостаточной изученности свойств и отсутствия комплексного подхода для оптимального выбора материалов в меняющихся условиях производства. Критерии эффективности определяются в зависимости от типа производства и имеющихся ресурсов, которыми располагает предприятие. При разных типах производства критерии эффективности производства могут быть различными, но самыми основными остаются фондоотдача, производительность труда, качество изделий, энергозатраты, экономическая эффективность (получение прибыли) [8–13]. Так, при единичном производстве важным критерием эффективности является именно качество готового изделия. Критериями эффективности при серийном производстве могут быть как качество, так и производительность, в зависимости от размера партии (мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное производства). При массовом производстве одним из ос-

³Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А., Крыжановский В.К., Куперман А.М. [и др.]. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособ. / под ред. А.А. Берлина. 3-е испр. изд. СПб.: Профессия, 2011. 560 с.

новых критериев является производительность труда.

При любом типе производства на этапе конструкторской подготовки производства одной из актуальных задач является выбор новых материалов для изготовления изделия или же для замены общепринятых конструкционных металлов. В связи с этим необходима эффективная методика, которая бы позволила разносторонне проанализировать материалы с варьированием критериев эффективности и условий сопоставимости, в связи с чем задача становится многовариантной и мультивариантной [14–23].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ и выбор материалов на этапе конструкторской подготовки производства изделий из композиционных материалов за счет применения методики многокритериального анализа при разных условиях сопоставимости.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы имеют свои физико-механические свойства, эксплуатационные условия. Поэтому существует необходимость производить сравнительный анализ по выбранной группе композиционных материалов по их свойствам для каждого конкретного вида детали, а затем выбирать оптимальный вариант. Сравнительный анализ имеющихся композиционных материалов и выбор оптимального варианта в варьируемых условиях сопоставления можно произвести по методике, разработанной нами и описанной ранее [24, 25]. Методика основана на матричном анализе, где исходная матрица вероятностей решений $M(a_{ij})$ состоит из безразмерных элементов (a_{ij}) , значения которых получаются путем кодирования значений параметров сравнения P_j , прошедших ранжирование с учетом приоритетности минимального или максимального значения параметра. Таким образом, строки матрицы представляют собой кодированные значения параметров, по которым ведется сравнительный анализ, соответственно, по одному из объектов сравнения. Количество строк – количество объектов сравнения. Выбирая варианты задач многофакторного анализа, ориентируясь на варианты ситуативных задач, проводятся расчеты в различных условиях сопоставимости. Причем чем больше

вариантов сопоставимости, объектов и параметров их сопоставления, тем эффективнее использование предлагаемой методики. Далее, по составленной матрице смежности рассчитывается итерированная значимость каждого объекта сравнения Q_i с учетом приоритетности минимального или максимального значения параметров по формуле:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad (1)$$

где n – количество сравниваемых объектов.

Численное значение итерированной значимости в последующем позволяет вычислить весовой критериальный коэффициент q_i для каждого объекта сравнения по формуле:

$$q_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j}. \quad (2)$$

Максимальное численное значение весового критериального коэффициента сигнализирует о его приоритетности при заданных условиях сопоставимости.

Рассмотрим примеры анализ и выбора на этапе конструкторской подготовки производства вида композиционного материала на полимерной основе для изготовления изделий.

Полимерные композиционные материалы обладают свойствами, которые по некоторым показателям превышают свойства известных нам традиционных конструкционных материалов (стали, алюминиевых и титановых сплавов, древесины). Поэтому в данной статье акцент будет сделан на выбор из многообразия полимерных композиционных материалов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные материалы.

В качестве исходных данных для проведения сравнительного анализа и выбора композиционных материалов предлагается использовать основные их физико-механические свойства, такие как:

- плотность P_1 , кг/м³, влияет на массу изделия из композита;
- теплопроводность P_2 , Вт/м·К, воздействует на отдачу и поглощение тепла материалом;
- водопоглощение P_3 за 24 ч, %, влияет на впитывание композитами влаги, из-за

чего происходит их расслоение и разрушение, что отрицательно сказывается на производстве изделий из композиционных материалов;

– модуль упругости P_4 , ГПа, характеризуется способностью композита упруго деформироваться при приложении к нему силы, он может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования материала;

– пределы прочности при, МПа: сжатии (P_5), изгибе (P_6) и растяжении (P_7) отражают пороговую величину, выше которой происходит разрушение изделия из композита.

Все вышеперечисленные свойства взяты из справочных материалов и находятся в общей доступности для предприятий³ [7, 26–30].

В таблице представлены основные виды полимерных композитов с указанием физико-механических свойств данных материалов. Численные значения физико-механических свойств полимерных композиционных материалов представлены в таблице как средние значения. Для реализации методики составим матрицу смежности $M(a_{ij})$, строки которой будут отражать материалы сравнения O_i , – в нашем случае полимерные композиционные материалы, а столбцы – параметры P_j , характеризующие эти объекты сравнения – физико-механические свойства композиционных материалов и стоимость.

Как видно выше, все перечисленные свойства имеют свои единицы измерения. Процесс кодирования значений в матрицу смежности может быть выполнен различными способами, в зависимости от выбранного метода сравнения и приоритета параметров. Далее, численные значения сводим в матрицу смежности $M(a_{ij})$, строки которой будут отражать сравниваемые между собой полимерные материалы O_i , а столбцы – параметры P_j , характеризующие физико-механические свойства данных материалов.

Для наглядности применения методики многокритериального анализа в расчет будут взяты параметры из таблицы и приняты следующие допущения: параметры P_1, P_2, P_3 – предпочтительны для конструкторских решений в минимальном значении критерия, в связи с этим необходимо принять их как кодированные безразмерные численные значения, которые складываются в элементы матрицы (a_{ij}) , равные обратной величине критерия

$$\frac{1}{P_1}, \frac{1}{P_2}, \frac{1}{P_3}.$$

Для параметров P_4, P_5, P_6, P_7 приоритетно наибольшее численное значение, так как это позволит применять изделия из композитов в механически жестких условиях работы, поэтому целесообразно представить значения параметров, характеризующих объекты сравнения, в виде безразмерных элементов

Физико-механические свойства полимерных композиционных материалов
 Physico-mechanical properties of polymer composite materials

Объекты сравнения	Параметры	Плотность, ρ , кг/м ³	Теплопроводность, λ , ккал/мм	Водопоглощение за 24 ч, %	Модуль упругости, E , ГПа	Предел прочности, σ , МПа			Стоимость, руб.
						при сжатии	при изгибе	при растяжении	
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
O_1	Стеклопластик	1900	0,75	0,25	60	795	965	1700	75
O_2	Углепластик	1525	1,0	0,125	350	1115	1835	2500	2899
O_3	Базальтопластик	2400	1,0	0,355	50	5000	1650	1200	48
O_4	Боропластик	2100	0,6	0,075	260	1150	1700	1300	3700
O_5	Органоластик	1300	1,6	0,375	137,5	181,5	490	775	2390
O_6	Текстолит	1350	0,275	0,7	22,4	200	130	200	465
O_7	Стеклотекстолит	1750	0,335	0,425	21	400	350	220	470
O_8	Армидоластик	1275	0,3	0,9	143,5	325	650	2000	1630

матрицы (a_{ij}) , равными прямым численным значениям P_4, P_5, P_6, P_7 .

Также для выбора композитов существует необходимость учета их стоимости P_8 (руб.) [24, 28, 29]. Высокая стоимость композиционных материалов влияет на финансовые затраты предприятия, поэтому за кодированные безразмерные элементы матрицы (a_{ij}) принимаем численные значения $\frac{1}{P_8}$.

В качестве примера применения методики произведем анализ нескольких частных

случаев **в различных условиях сопоставимости:**

Первое: если брать во внимание, что на производстве при выборе конструкционного полимерного материала должны учитываться все физико-механические свойства и стоимость материала, произведем сравнительный анализ всех вышеперечисленных полимерных материалов ($O_1...O_8$) с учетом всех приведенных в таблице параметров, характеризующих данные материалы ($P_1...P_8$). Матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & \frac{1}{1900} & \frac{1}{0,75} & \frac{1}{0,25} & 60 & 795 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & \frac{1}{1525} & \frac{1}{1,0} & \frac{1}{0,125} & 350 & 1115 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & \frac{1}{2400} & \frac{1}{1,0} & \frac{1}{0,355} & 50 & 5000 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & \frac{1}{2100} & \frac{1}{0,6} & \frac{1}{0,075} & 260 & 1150 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & \frac{1}{1300} & \frac{1}{1,6} & \frac{1}{0,375} & 137,5 & 181,5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & \frac{1}{1350} & \frac{1}{0,275} & \frac{1}{0,7} & 22,4 & 200 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & \frac{1}{1750} & \frac{1}{0,335} & \frac{1}{0,425} & 21 & 400 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & \frac{1}{1275} & \frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,9} & 143,5 & 325 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Полученные в результате вычислений значения весового критериального коэффициента формируем в итоговый вектор для анализируемых полимерных композиционных материалов:

$$q = \begin{pmatrix} 0,144 \\ 0,263 \\ 0,395 \\ 0,188 \\ 0,060 \\ 0,020 \\ 0,037 \\ 0,126 \end{pmatrix}$$

Второе: предположим, что при конструировании изделий из вышеперечисленных полимерных материалов ($O_1...O_8$) важны показатели ($P_4...P_8$). То есть производитель изделий из полимерных материалов не берет во внимание такие параметры, как плотность,

теплопроводность и водопоглощение. Акцент при выборе делается на пределы прочности материала, модуль упругости и стоимость материала. При данных условиях матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & 60 & 795 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & 350 & 1115 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & 50 & 5000 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & 260 & 1150 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & 137,5 & 181,5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & 22,4 & 200 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & 21 & 400 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & 143,5 & 325 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Значения весового критериального коэффициента при втором условии сопоставимости для анализируемых полимерных композиционных материалов в этом случае выглядит так:

$$q = \begin{pmatrix} 0,1445 \\ 0,2627 \\ 0,3955 \\ 0,1879 \\ 0,0602 \\ 0,0202 \\ 0,0369 \\ 0,1260 \end{pmatrix}$$

Третье: предположим, что при конструировании изделий из вышеперечисленных полимерных материалов ($O_1...O_8$) важны параметры (P_4, P_6, P_7 , и P_8). То есть условия частично схожи со вторым условием сопоставимости, но исключают еще предел прочности на сжатие, тогда матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_4 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & 60 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & 350 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & 50 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & 260 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & 137,5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & 22,4 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & 21 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & 143,5 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Значение весового критериального коэффициента при втором условии сопоставимости для анализируемых полимерных композиционных материалов в этом случае будет выглядеть так:

$$q = \begin{pmatrix} 0,1705 \\ 0,3341 \\ 0,1834 \\ 0,2110 \\ 0,0810 \\ 0,0192 \\ 0,0326 \\ 0,1755 \end{pmatrix}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным композиционным материалом для конструирования изделий при первом и втором условиях сопоставимости является материал O_3 – базальтопластик, у которого наибольшее значение q в первом случае равно 0,3947, а втором – 0,3955. Вторым по приоритетности будет материал O_2 – углепластик, у которого значение q в первом случае равно 0,2626, а втором случае – 0,2627.

При третьем условии сопоставимости оптимальным вариантом композиционного материала стал O_2 – углепластик, у которого наибольшее значение $q = 0,3341$. Вторым по приоритетности будет материал O_4 – боропластик, у которого значение $q = 0,2110$ при заданных условиях сравнения. Также в заданных условиях сравнения можно увидеть, что материалы O_1, O_3, O_8 находятся на близком уровне, численные значения 0,1705; 0,1834 и 0,1755 соответственно.

Данные примеры являются только одними из многих решений, которые могут быть применены на практике, т.к. при решении практических задач в реальном производстве при выборе конструкционного материала изделий из композиционных материалов индивидуально определяются параметры, которые могут варьироваться и менять свою приоритетность в зависимости от условий эксплуатации изделий на момент принятия обоснованного решения, что характерно для обеспечения гибкости производства. В дальнейшем возможен уточняющий расчет либо с учетом дополнительных параметров, характеризующих композиты, либо по конкретным маркам композиционных материалов в выбранной группе. В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что применение разработанной методики может повысить эффективность подготовки производства в 2–3 раза (в зависимости от сложности оцениваемой системы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованный выбор конструкционного материала – это сложная и комплексная задача, которая должна учитывать большое количество факторов: физико-механические

свойства для определения прочностных характеристик изделия в условиях эксплуатации конструкции, стоимость материала – для оценки экономической составляющей производства. Количество параметров в реальных условиях производства значительно выше, т.к. при учете не только конструкторской, но и технологической составляющей подготовки производства появляется дополнительно большое количество параметров и критериев, которые необходимо ранжировать исходя из условий сопоставимости на момент принятия решений. Использование методики анализа многокритериальных систем помогает улучшить качество конструкторско-технологической подготовки производства, сократить издержки и повысить конкурентоспособность продукции на рынке. Предложенная методика позволяет

производить сравнительный анализ широкой гаммы объектов и систем при подготовке производства. С помощью нее возможно производить выбор не только материала для изготовления изделий, но и оптимальный выбор инструментального материала для обработки композиционных материалов, режимов резания и геометрии инструмента с учетом накопленной в результате эмпирических исследований базы знаний по методам лезвийной обработки таких материалов. В качестве параметров сравнения могут выступать общеизвестные справочные данные и рекомендации, технико-экономические и качественные параметры обработки. При изменении приоритетности параметров условия сопоставимости могут меняться, образуя возможные множества мультивариантной системы.

Список источников

1. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Базаркина В.В. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконных композиционных материалов на полимерной основе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3. С. 150–153. EDN: PDETAD.
2. Плотников В.В., Шалунов Е.П., Смирнов В.М., Миллин А.Б. Жаропрочные и износостойкие железомедные композиционные материалы для деталей тяжело нагруженных пар трения // Актуальные проблемы в машиностроении. 2023. Т. 10. № 3-4. С. 57–62. EDN: TNKYOK.
3. Владимирова Ю.О., Данилов П.Г., Шалунов Е.П. Использование жаропрочных и износостойких материалов для теплонапряженных деталей узлов трения // Современные технологии: проблемы и перспективы: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых (г. Севастополь, 19–22 апреля 2021 г.). Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2021. С. 14–18. EDN: KAAKSC.
4. Данилов П.Г., Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П. Анализ современных материалов и использование наиболее оптимальных из них для подшипников скольжения коленчатого вала высокофорсированных дизельных двигателей // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. Т. 7. № 3-4. С. 69–76. EDN: FOUXMT.
5. 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 Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 14–15 декабря 2020 г.). Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 141–144. EDN: ULQBJN.
6. Davim J.P., Reis P., Antonio C.C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up // Composites Science and Technology. 2004. Vol. 64. Iss. 2. P. 289–297. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00253-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00253-7). EDN: KJOAAL.
7. Капитонов А.М., Редькин В.Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 532 с. EDN: RLSKQR.
8. Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Максимчук О.В. Исследование и выбор параметров при проектировании технологических машин: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. 260 с. EDN: VZWWWY.
9. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Качество поверхности при обработке резанием полимерных композиционных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2016. № 9. С. 3–6. <https://doi.org/10.14489/hb.2016.09.pp.003-006>. EDN: WHMBNT.
10. Пушнин В.Н., Корнев Д.Ю., Вахрушев Н.В., Скиба В.Ю., Парц К.А. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 97–101. EDN: TFUZX.
11. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2006. № 4. С. 17–19. EDN: OWRQVT.
12. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. 2008. № 4. С. 214–216. EDN: QBSVKN.

13. Татанов П.В., Шнайдер Д.А., Янюшкин А.Р., Янюшкин А.С. Влияние износа оборудования на качество изготовления изделий из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 10. С. 34–41. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-10-34-41>. EDN: OFCPCS.
14. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 511–516. EDN: VWUWGN.
15. Kovalev S.P., Nelyub V.A., Shelofast V.V. Multi-criteria analysis of aircraft structures fracture // Russian Aeronautics. 2015. Vol. 58. Iss. 4. P. 370–375. <https://doi.org/10.3103/S1068799815040029>. EDN: WVKPKV.
16. Зубарев Ю.М., Солнцев Н.Н., Вебер А.В., Веденов В.Н., Барсуков В.А. Инжиниринг проектной и технологической подготовки производства // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 12. С. 28–31. <https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.028-031>. EDN: KKBTKL.
17. Макаров В.Ф., Туктамышев В.Р., Масленков С.В., Катаев Я.А., Койнов И.И., Трепезаева О.И. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на основе синхронного подхода // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 9. С. 35–39. EDN: STBWZJ.
18. Skorobogatov A., Kobzev V. Fuzzy-multiple approach in design and technology management modeling preparation of production at machine-building enterprises // Sustainable Development and Engineering Economics. 2022. Iss. 3. P. 23–39. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2022.3.2>. EDN: IMNCVA.
19. Kozłowska Ju. Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review // Engineering Management in Production and Services. 2022. Vol. 14. Iss. 2. P. 116–137. <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0021>. EDN: GRZITX.
20. Barfod M.B., Salling Kim Bang, Leleur S. Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis // Decision Support Systems. 2011. Vol. 51. Iss. 1. P. 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.005>. EDN: OLNCJF.
21. Kochetkov A.V., Melnikov P.A., Zakharov O.V., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M., Kushnikov V.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine: III International Scientific Conference (Tomsk, 23–26 May 2016). Tomsk: Atlantis Press, 2016. P. 520–523. EDN: XWUSZF.
22. Yatsalo B., Korobov A., Martínez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: a new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment // Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 84. P. 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.005>. EDN: XMYAAQ.
23. Ilchenko I.A., Pegashkin V.F. Mutual optimization of design and process preparation of production in mechanical engineering // Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy (Nizhny Tagil, 17–19 June 2021). Nizhny Tagil, 2022. Vol. 2456. Iss. 1. P. 030028. <https://doi.org/10.1063/5.0074789>.
24. Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Последовательность и критерии выбора оптимального варианта производственной системы // Актуальные проблемы в машиностроении. 2023. Т. 10. № 1-2. С. 21–27. EDN: LPAINJ.
25. Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Методика критериального анализа мультивариантных систем // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25. № 1. С. 85–97. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97>. EDN: MKIZCO.
26. Францев М.Э., Кирейнов А.В. Результаты сравнительных испытаний композиционных материалов судостроительного назначения на основе стеклянных и базальтовых волокон на полиэфирном связующем на водопоглощение // Транспортные системы. 2019. № 1. С. 41–48. https://doi.org/10.46960/62045_2019_1_41. EDN: VCSVDO.
27. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 206–212. EDN: TZDYSF.
28. Лобанов Д.В., Рафанова О.С., Владимирова Н.А. Оценка экономичности лезвийной обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 30–35. EDN: XKDGBC.
29. Анциферов В.Н., Бездудный Ф.Ф., Белянчиков Л.Н., Бецофен С.Я., Бондаренко Г.Г., Бухаров С.В. [и др.]. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.
30. Пелевин Ф.В., Никифоров Н.А., Полежаев Ю.В., Рагуля А.В., Скороход В.В., Уварова К.В. [и др.]. Материалы и покрытия в экстремальных условиях: монография. В 3-х т. Т. 2. М.: Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с. EDN: VOQAQH.

References

1. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Bazarkina V.V. Perfection of technology of formation of the form of high-strength glass-fiber composite materials on the polymeric basis. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2012;3:150-153. (In Russ.). EDN: PDETAD.
2. Plotnikov V.V., Shalunov E.P., Smirnov V.M., Millin A.B. Plotnikov V.V., Shalunov E.P., Smirnov V.M., Millin A.B. Heat-resistant and wear resistant iron-copper composite materials for parts of heavy-loaded friction pairs. *Actual Problems in Machine Building*. 2023;10(3-4):57-62. (In Russ.). EDN: TNKYOK.
3. Vladimirova Yu.O., Danilov P.G., Shalunov E.P. Use of heat-resistant and wear-resistant materials for heat-stressed parts of friction units. In: *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii dlya aspirantov, studentov i molodyh uchenykh = Modern technologies: problems and prospects: collected*

articles of the All-Russian scientific and practical conference for post graduates, students and young scientists. 19–22 April 2021, Sevastopol'. Sevastopol': Sevastopol State University; 2021, p. 14-18. (In Russ.). EDN: KAAKSC.

4. Danilov P.G., Vladimirova Yu.O., Shalunov E.P. Analysis of modern materials and use of the most optimal of them for the crankshaft sliding bearings of highly forced diesel engines. *Actual Problems in Machine Building*. 2020;7(3-4):69-76. (In Russ.). EDN: FOUXMT.

5. Lobanov D.V., Vladimirova N.A., Rafanova O.S. Edge-cutting features of polymer composite materials and cutting tool shaping. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoj promyshlennosti: materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov = Electrophysical processing methods in modern industry: materials of the 4th International scientific and practical conference of young scientists, postgraduates and students*. 14–15 December 2020, Perm'. Perm': Perm National Research Polytechnic University; 2021, p. 141-144. (In Russ.). EDN: ULQBJN.

6. Davim J.P., Reis P., Antonio C.C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*. 2004;64(2):289-297. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(03\)00253-7](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00253-7). EDN: KJOAAL.

7. Kapitonov A.M., Red'kin V.E. *Physico-mechanical properties of composite materials. Elastic properties*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2013, 532 p. (In Russ.). EDN: RLSKQR.

8. Podgorniy Yu.I., Skiba V.Yu., Martynova T.G., Maksimchuk O.V. Analysis and choice of parameters in designing technological machines. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2020, 260 p. (In Russ.). EDN: VZWWY.

9. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V., Zaostrovskii A.S. Surface quality while machining of polymeric composite materials. *Handbook. An Engineering Journal*. 2016;9:3-6. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2016.09.pp.003-006>. EDN: WHMBNT.

10. Pushnin V.N., Kornev D.Yu., Vahrushev N.V., Skiba V.Yu., Parc K.A. Forecasting technical characteristics of integrated technological equipment. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014;2:97-101. (In Russ.). EDN: TFUZMX.

11. Ivantsivskiy V.V., Skiba V.Yu., Stepanova N.P. Methodology for assigning rational modes of steel surface hardening using concentrated heating sources. *Metal Working and Material Science*. 2006;4:17-19. (In Russ.). EDN: OWRQVT.

12. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Software products for automating the preparation of tool production at enterprises. *Polzunovskij al'manah*. 2008;4:214-216. (In Russ.). EDN: QBSVKN.

13. Tatanov P.V., Shnader D.A., Yanyushkin A.R., Yanyushkin A.S. Depreciation effect on equipment reliability of manufacturing products made of composite materials. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;10:34-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-10-34-41>. EDN: OFCPCS.

14. Markov A.M., Markova M.I., Dronova O.B. Technological preproduction for mechanical working. *Actual Problems in Machine Building*. 2016;3:511-516. (In Russ.). EDN: VWUWGN.

15. Kovalev S.P., Nelyub V.A., Shelofast V.V. Multi-criteria analysis of aircraft structures fracture. *Russian Aeronautics*. 2015;58(4):370-375. <https://doi.org/10.3103/S1068799815040029>. EDN: WVKPKV.

16. Zubarev Yu.M., Solntsev N.N., Weber A.V., Vedenov V.N., Barsukov V.A. Engineering of design and technological preparation of production. *Handbook. An Engineering Journal*. 2021;12:28-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.028-031>. EDN: KKBTKL.

17. Makarov V.F., Tuktamyshev V.R., Maslenkov S.V., Kataev Ya.A., Koynov I.I., Trepezaeva O.I. Automation of design-engineering preparation of production on the base of synchronous approach. (In Russ.). *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014;9:35-39. EDN: STBWZJ.

18. Skorobogatov A., Kobzev V. Fuzzy-multiple approach in design and technology management modeling preparation of production at machine-building enterprises. *Sustainable Development and Engineering Economics*. 2022;3:23-39. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2022.3.2>. EDN: IMNCVA.

19. Kozłowska Ju. Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review. *Engineering Management in Production and Services*. 2022;14(2):116-137. <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0021>. EDN: GRZITX.

20. Barfod M.B., Salling Kim Bang, Leleur S. Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis. *Decision Support Systems*. 2011;51(1):167-175. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.005>. EDN: OLNCJF.

21. Kochetkov A.V., Melnikov P.A., Zakharov O.V., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M., Kushnikov V.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity. In: *Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine: 3^d International Scientific Conference*. 23–26 May 2016, Tomsk. Tomsk: Atlantis Press; 2016, p. 520-523. EDN: XWUSZF.

22. Yatsalo B., Korobov A., Martínez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: a new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*. 2017;84:262-271. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.005>. EDN: XMYAAQ.

23. Ilchenko I.A., Pegashkin V.F. Mutual optimization of design and process preparation of production in mechanical engineering. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy*. 17–19 June 2021, Nizhny Tagil. Nizhny Tagil; 2022, vol. 2456, Iss. 1, p. 030028. <https://doi.org/10.1063/5.0074789>.

24. Lobanov D.V., Rafanova O.S. Sequence and criteria for choosing the optimal variant of the production system. *Actual Problems in Machine Building*. 2023;10(1-2):21-27. (In Russ.). EDN: LPAINJ.

25. Lobanov D.V., Rafanova O.S. Methodology for criteria analysis of multivariant system. *Metal Working and Material Science*. 2023;25(1):85-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97>. EDN: MKIZCO.
26. Frantsev M.E., Kireinov A.V. Results of comparative water absorption tests of shipbuilding composite materials based on glass and basalt fibers on a polyester binder. *Transportnye sistemy*. 2019;1:41-48. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/62045_2019_1_41. EDN: VCSVDO.
27. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Analysis and rational choice of polymer composite materials for products based on their physical and mechanical properties. *Actual Problems in Machine Building*. 2015;2:206-212. (In Russ.). EDN: TZDYSF.
28. Lobanov D.V., Rafanova O.S., Vladimirova N.A. Estimation of the economy of composite materials blade processing. *Actual Problems in Machine Building*. 2021;8(3-4):30-35. (In Russ.). EDN: XKDGBC.
29. Antsiferov V.N., Bezudnyj F.F., Belyanchikov L.N., Betsofen S.Ya., Bondarenko G.G., Bukharov S.V., et al. *New materials*. Moscow: MISIS; 2002, 736 p. (In Russ.).
30. Pelevin F.V., Nikiforov N.A., Polezhaev Yu.V., Ragulya A.V., Skorohod V.V., Uvarova K.V., et al. *Materials and coatings in extreme conditions*. M.: Bauman Moscow State Technical University; 2002, 296 p. (In Russ.). EDN: VOQAQH.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобанов Дмитрий Владимирович,

д.т.н., доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия
✉ lobanovdv@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>

Рафанова Олеся Сергеевна,

аспирант,
ассистент кафедры технологии машиностроения,
Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия
olesya-karamaeva89@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0560-4730>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Lobanov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky pr., Cheboksary 428015, Russia
✉ lobanovdv@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>

Olesya S. Rafanova,

Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky pr., Cheboksary 428015, Russia
olesya-karamaeva89@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0560-4730>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.05.2024 г.; принята к публикации 15.05.2024 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 08.05.2024; accepted for publication 15.05.2024.