

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ\*

*Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор  
Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент  
С.А. СИДОРЕНКО, магистрант  
(БрГУ, г. Братск)*

Поступила 16 декабря 2016  
Рецензирование 17 января 2017  
Принята к печати 15 февраля 2017

**Лобанов Д.В.** – 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40,  
Братский государственный университет,  
e-mail: mf\_nauka@brstu.ru

Представлены пути повышения эффективности применения композитов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные материалы в области машиностроения там, где это возможно; раскрыты этапы разработки программного продукта для подготовки производства изделий из композитов; представлен программный модуль для создания базы данных композитов, описан принцип работы программного продукта; отмечена необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах и автоматизации операций поиска, анализа и принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала; изображен алгоритм, в основе которого лежит методика многокритериального анализа и выбора рационального объекта; представлен программный продукт для выбора рациональных композиционных материалов по их параметрам (плотность; предел прочности: при растяжении, сжатии, изгибе; модуль упругости; стоимость; теплопроводность и т. д.) в условиях реального производства; отражены перспективы дальнейшей реализации результатов исследований.

**Ключевые слова:** автоматизация, эффективность, рациональный выбор, программный модуль (продукт, комплекс), подготовка производства, композиционные материалы.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29

## Введение

В связи с истощением природных ресурсов и повышением стоимости энергии все более актуальным становится процесс изготовления в промышленном производстве композиционных материалов (стеклопластика, базальтопластика, карбонопластика, углепластика и т. д.). Пополнение сырьевой базы производства возможно за счет переработки вторичного сырья и техногенных отходов [1–5].

Общепринятые конструкционные материалы – металлы и их сплавы – на сегодняшний день не в состоянии удовлетворить возросшие требования по прочности, износостойкости, долговечности и многим другим эксплуатационным показателям. Существующие методы повышения свойств металлов и сплавов затратны [6–12], требуют дополнительного оборудования и оснастки [13–18], поэтому актуальна разработка и использование для этих целей композитов. Композиционные материалы, а также конструкции

\* Работа выполнена в рамках проекта У.М.Н.И.К.-2015 № 0011203 «Разработка системы автоматизации процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента».

и изделия из них нашли широкое применение в различных областях промышленности (машиностроении, судостроении, авиастроении, военной промышленности и т. д.). Они имеют высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к агрессивным химическим средам, низкие тепло- и электропроводность, хорошие триботехнические характеристики [18–22].

В настоящее время известно множество композитов, все они по-своему индивидуальны и имеют определенные характеристики, что, в свою очередь, ведет к затруднениям, связанным с их рациональным выбором. Требуется разносторонний, комплексный анализ материалов с учетом показателей, наиболее значимых для определенного вида продукции. Это, как правило, трудоемкий и длительный процесс, так как требует обработки большого массива информации. Поэтому для повышения эффективности процесса подготовки производства существует необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах и автоматизации операций поиска, анализа, принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала [12–27].

Автоматизация процесса подготовки производства позволит избавиться от ручной обработки огромного массива информации о композиционных материалах при выборе рационального варианта решения, тем самым минимизировать затраты времени на выбор и поиск материала и повысить эффективность применимости композитов в современной промышленности.

### Методика экспериментального исследования

Многообразие видов композиционных материалов ведет к затруднениям, связанным с принятием обоснованных решений по их рациональному выбору. В связи с этим нами разработана методика многокритериального анализа и выбора [27], сущность которой заключается в выявлении критериев, значимых для производства на момент принятия обоснованного решения, позволяющая проанализировать, оценить и выявить рациональный вариант решения в зависимости от заданной пользователем приоритетности показателей. Обозначим показатели через  $P_i$ , а материалы, которым соответствуют

значения показателей, через  $O_i$ , составим матрицу смежности:

$$C(a_{nk}) = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & \dots & P_k \\ O_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ O_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ O_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы принимают количественные прямые или обратные (в зависимости от приоритета большей или меньшей величины) кодированные значения, по которым оцениваются и сравниваются материалы.

Далее по матрице смежности рассчитываем весовой критериальный коэффициент, значение которого и будет определять рациональный материал [28].

Процесс выбора рационального композита требует, прежде всего, занести в базу данных основную информацию о композитах: вид, название и марку композиционного материала, физико-механические свойства, стоимость и специфическую информацию производителя. После заполнения базы данных необходимо указать значимые в заданных условиях показатели, характерные для композиционных материалов и, если имеется необходимость, задать (уточнить) предельные значения параметров, после чего осуществить выбор материала. Для разработки программных продуктов процесса выбора рационального композиционного материала произведена алгоритмизация [29].

### Результаты и обсуждения

Процесс выбора рационального композиционного материала из множества по методике многокритериального анализа очень трудоемкий и занимает много времени в связи с огромным объемом обрабатываемых данных. Исходя из этого для автоматизации процесса выбора композита необходимо систематизировать данные о композиционных материалах. Предлагается создать базу знаний, содержащую исходную информацию о композитах, которая хранится в отдельном файле и включает в себя сведения о физико-механических свойствах композитов, их стоимости, производителе, обоснованную тех-

нической или справочной литературой, каталогами или электронными ресурсами. Для этого нами создан программный модуль, хранящий данные о композиционных материалах [30]. Он направлен на работу с базой данных композитов и представляет собой инструмент, дающий

право пользователю в диалоговом режиме вести заполнение, редактирование, правку, удаление, и поиск композиционных материалов. Диалоговое окно программы для работы с базой данных композиционных материалов представлено на рис. 1.

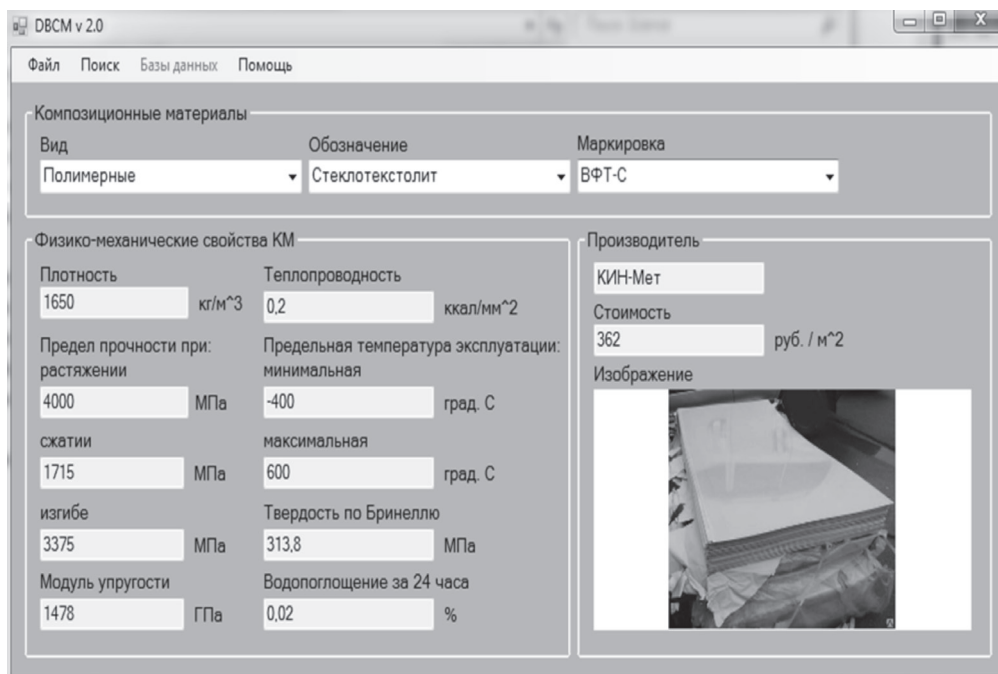


Рис. 1. Диалоговое окно программы для работы с базой данных композитов

Исходная информация в программном модуле отражена в полях редактирования, которые содержат определенный набор данных, соответствующих выбранному из списка композиту.

Основное меню программы позволяет переходить в следующие режимы: добавление новых материалов, выбор рационального материала из созданной базы данных, сохранение текущего состояния введенной информации, создание и просмотр отчетов по всем параметрам, характерным для композитов. Кроме того, в данном модуле предусмотрена возможность в диалоговом режиме вносить, править или удалять исходную информацию о композиционных материалах и их физико-механических свойствах, производителе и стоимости.

Для повышения эффективности процесса принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала за счет автоматизации разработан программный модуль, представленный на рис. 2.

Этот модуль предоставляет пользователю возможность выбора композиционных матери-

алов в зависимости от значимости параметров, избранных в качестве приоритетных. Диалоговое окно программы содержит блок по выбору значимых свойств материалов, который предназначен для избрания приоритетных на момент принятия решения свойств композитов (установка/снятие меток напротив названий свойств композитов). В этом блоке модуля содержатся физико-механические и эксплуатационные свойства материалов. В нижней части модуля расположен блок, в котором отражаются результаты анализа и выбора. Следует отметить, что при увеличении количества показателей анализ и выбор полимерного композиционного материала будет более обоснованным. При необходимости в дальнейшем программа может быть дополнена другими свойствами и параметрами, характеризующими композиты [31].

Для выбора рационального композита пользователю предлагается в диалоговом режиме избрать значимые на момент принятия решения параметры путем установки меток напротив приоритетных свойств. После чего, если поль-

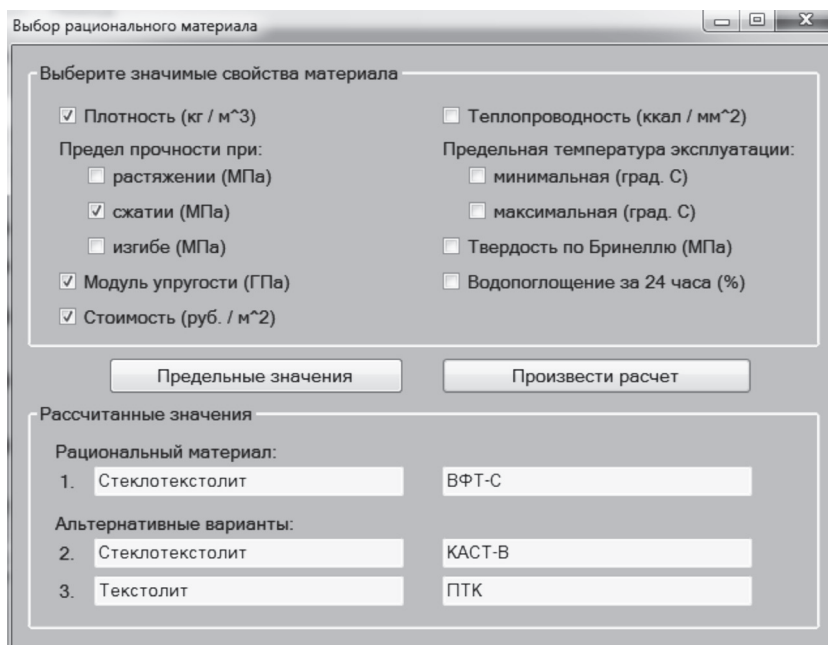


Рис. 2. Диалоговое окно программы для выбора рационального композита

зователю необходимы уточненные предельные значения того или иного показателя, требуется нажать на кнопку «Предельные значения» (рис. 2), и в открывшемся дополнительном диалоговом окне (рис. 3) задать численные ограничения параметров композиционных материалов [32].

Стоит отметить, что для редактирования предельных значений доступны только поля тех

свойств, которые ранее выбраны в качестве приоритетных. После указания ограничений параметров композиционных материалов необходимо нажать на кнопку «Сохранить ограничения», в результате чего система вернется к предыдущему диалоговому окну (рис. 2). Затем следует осуществить выбор рационального композита путем нажатия на кнопку «Произвести расчет» [33].

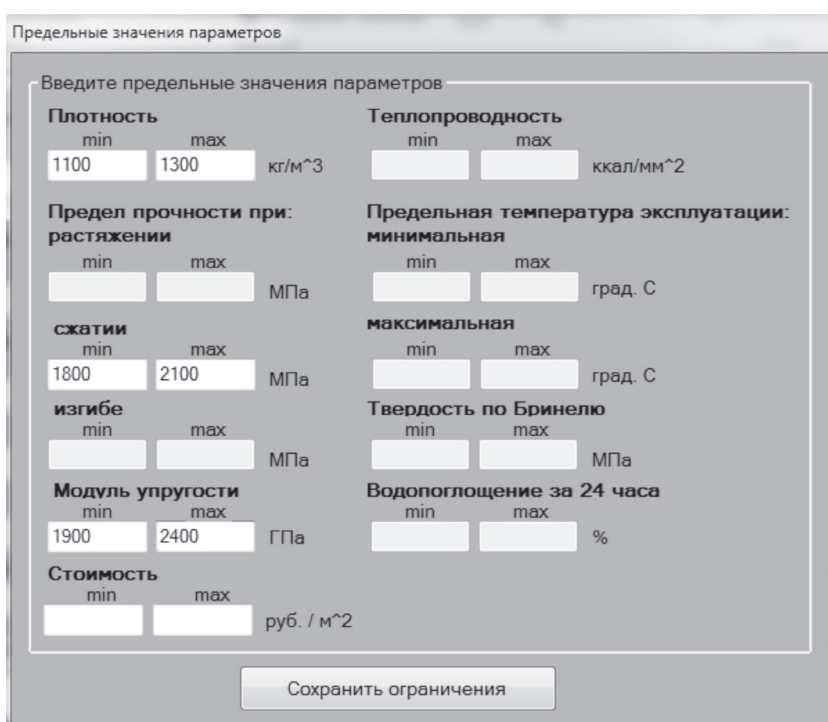


Рис. 3. Диалоговое окно программы для ввода предельных значений параметров композиционных материалов



Если в численных ограничениях свойств нет необходимости, то на этапе выбора значимых параметров следует нажать на кнопку «Произвести расчет», в результате чего система произведет расчет на основе имеющихся данных в базе, а в блоке «рассчитанные значения» отобразятся рациональный материал и два альтернативных [34].

Созданные программные формы ориентированы на автоматизацию процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов. Они позволяют в едином программном продукте производить создание базы данных и выбор рационального композита для производственных условий, что автоматизирует технологию и тем самым повышает эффективность процесса подготовки производства.

### Выводы

Разработанная методика многокритериального анализа позволила сократить время на выбор рационального композиционного материала, тем самым повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композитов.

Созданный программный модуль для формирования базы данных композиционных материалов позволил упорядочить и систематизировать данные о композиционных материалах. На сегодняшний день база содержит более 100 композитов, из них около 70 полимерных, 10 древесно-полимерных, 15 керамических, около 20 металлических композиционных материалов, а также 10, характеризующих их эксплуатационные параметры. База данных редактируема и может быть дополнена другими композиционными материалами и их свойствами, появившимися в распоряжении пользователей.

Разработанный программный модуль для анализа и выбора рационального композита позволил автоматизировать процесс выбора рационального композиционного материала в зависимости от варьируемых параметров сопоставимости.

Методика, алгоритмы и программные продукты на их основе позволили за счет автоматизации повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов, в 62,5 раза ускорить процесс принятия синтезированного решения по выбору рации-

онального композита и достичь годового экономического эффекта до 7000 руб/г.

Разработанные программные продукты имеют мировой приоритет, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### Список литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин, Ю.А. Горбаткина, В.К. Крыжановский, А.М. Куперман, И.Д. Симонов-Емельянов, В.И. Халнулин, В.А. Бунаков; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с. – ISBN 978-5-93913-130-8.
2. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, iss. 7. – P. 733–736. – doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007.
3. Chung D.D.L. Composite materials: functional materials for modern technologies. – 2<sup>nd</sup> ed. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0.
4. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.
5. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2010. – № 2. – С. 26–29.
6. Pascual M.J., Duran A., Pascual L. Sintering behaviour of composite materials borosilicate glass-zrO<sub>2</sub> fibre composite materials // Journal of the European Ceramic Society. – 2002. – Vol. 22, iss. 9–10. – P. 1513–1524. – doi: 10.1016/S0955-2219(01)00479-4.
7. Nano-ag: polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching / X. Hu, P. Jiang, Ch. Xin, H. Yang, Q. Gong // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 94, iss. 3. – P. 031103. – doi: 10.1063/1.3073712.
8. Доц М.В., Марков А.М. Автоматизация проектирования токарной обработки композиционных материалов // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2011. – С. 112–115.
9. 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.

10. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

11. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н. Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4. – С. 19–25.

12. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon / N. Plotnikova, A. Losinskaya, V. Skeebe, E. Nikitenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351.

13. Skeebe V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 88–94. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88.

14. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 11–18.

15. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “Diamond Smoothing” / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 125. – P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

16. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Y. Skeebe, I.A. Bataev, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012025. – doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

17. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

18. Acoustic analysis of composite soft materials, II characterization of composite materials containing glass beads / M. Maebayashi, S. Otsuka, T. Matsuoka, S. Koda // Japanese Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 42, N 5B. – P. 2939–2943.

19. Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites / S. Kari, H. Berger, U. Gabbert, R. Guinovart-Diaz, J. Bravo-Castillero, R. Rodriguez-Ramos // Composites Science and Technology. – 2008. – Vol. 68, N 3–4. – P. 684–691. – doi: 10.1016/j.compscitech.2007.09.009.

20. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». – 2005. – № S2. – С. 41–62.

21. Рудых О.Л., Меламед Э.Ш. Основы систем автоматизированного проектирования строительных конструкций. Ч. 2. Виды обеспечений САПР (программно-аппаратные средства): учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 157 с.

22. Steady-state and transient-state optical properties of a charge-transfer composite material MO-PPV/SWNTs / S. Chu, W. Yi, S. Wang, F. Li, W. Feng, Q. Gong // Chemical Physics Letters. – 2008. – Vol. 451, iss. 1–3. – P. 116–120. – doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.087.

23. Nano-porous Si/C composites for anode material of lithium-ion batteries / Y. Zheng, J. Yang, J. Wang, Y. NuLi // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 52, iss. 19. – P. 5863–5867. – doi: 10.1016/j.electacta.2007.03.013.

24. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system / X.C. Ma, G.Q. He, D.H. He, C.S. Chen, Z.F. Hu // Wear. – 2008. – Vol. 265, iss. 7–8. – P. 1087–1092. – doi: 10.1016/j.wear.2008.02.015.

25. Li J.L., Xiong D.S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection // Wear. – 2008. – Vol. 265, iss. 3–4. – P. 533–539. – doi: 10.1016/j.wear.2007.09.005.

26. Synthesis and electronic behaviors of  $\text{CeO}_2/\text{C}$  carbon clusters composite material / H. Miyazaki, H. Matsui, H. Kitakaze, S. Karuppuchamy, S. Ito, M. Yoshihara // Materials Chemistry and Physics. – 2009. – Vol. 113, iss. 1. – P. 21–25. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.087.

27. Методика выбора композиционных материалов взамен общепринятых конструкционных / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова // Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной научно-практической конференции (25–26 декабря 2014 года). – Курск, 2014. – С. 255–261.

28. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова

ва // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 206–213.

29. Сидоренко С.А., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программный продукт для автоматизации выбора рационального композиционного материала // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 30–36.

30. Формирование базы данных композиционных материалов (DBCM v. 1.0): свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611925 / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Рычков. – Заявка № 2015662595; заявл. 18.12.2015; зарег. 15.02.2016.

31. Выбор композиционного материала (SCM v. 1.0): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616679 / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Рычков. – Заявка № 2016611730; заявл. 03.03.2016; зарег. 16.06.2016.

32. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 942–947. – doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.067.

33. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects / L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov, A.S. Chermoshentseva, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012077. – doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012077.

34. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Повышение эффективности применения лезвийного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов // Проблемы механики современных машин: материалы VI Международной конференции / отв. ред. В.С. Балбаров. – М., 2015. – С. 183–189.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 20–29

### Efficiency upgrading of composite material product production preparation

**Lobanov D.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf\_nauka@brstu.ru

**Rychkov D.A.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

**Sidorenko S.A.**, Master's Degree student, e-mail: serzh\_sidorenko\_1993@mail.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

#### Abstract

The paper presents the ways to improve the utilization efficiency of the composites, which are proposed to replace conventional construction materials in engineering, where is possible. Software for composite material product production preparation stages of development, which include: the development of methods of forming composites database, multi-criteria analysis methods and rational choice of the composite material varied according to the compatibility of the parameters are revealed. The collecting and analysis of algorithms, the choice of the composite tool is presented. The formation of the base composition of composite materials is suggested. A software module for creation of the given composites database, the principle of software module work is presented. The software module introduces data on the form, and the designation of the brand of composite materials, its physical and mechanical properties, manufacturer, cost and image. The need in composite data structuring and organizing, analysis and synthesized decision solution of the rational composite material choice is noted. The algorithm which is based on the method of multi-criteria analysis and rational object selection is depicted. A program product for the rational choice of materials by its composition parameters (density, tensile strength: tensile, compressive, bending modulus, cost, thermal conductivity, etc.) under conditions of actual production with selection composites priority indicators and composites search by limiting the maximum number of values of the properties of composites is presented. The findings of research that reflect the spirit and scope of the performed work are described. The prospects for further implementation of the research results are reflected.

#### Keywords

automation; efficiency; rational choice; program module (product set); pre-production; composite materials.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29



## References

1. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Gorbatkina Yu.A., Kryzhanovskii V.K., Kuperman A.M., Simonov-Emel'yanov I.D., Khalnulin V.I., Bunakov V.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymeric composites: structure, properties, technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2008. 560 p. ISBN 978-5-93913-130-8.
2. Gorokhovskiy A.V., Escalante-Garcia J.I., Gashnikova G.Yu., Nikulina L.P., Artemenko S.E. Composite materials based on wastes of flat glass processing. *Waste Management*, 2005, vol. 25, iss. 7, pp. 733–736. doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007
3. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. 2nd ed. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0
4. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii – Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
5. Mordvin M.A., Yakimov S.V., Baklushin S.M. Rekomendatsii po mekhanicheskoi obrabotke kompozitsionnykh materialov [Recommendations for the machining of composite materials]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Izhevsk State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 26–29.
6. Pascual M.J., Duran A., Pascual L. Sintering behaviour of composite materials borosilicate glass-zrO<sub>2</sub> fibre composite materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, vol. 22, iss. 9–10, pp. 1513–1524. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00479-4
7. Hu X., Jiang P., Xin Ch., Yang H., Gong Q. Nano-ag: polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 3, p. 031103. doi: 10.1063/1.3073712
8. Dots M.V., Markov A.M. [Design automation turning composites] *Trudy 2-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference "Innovations in mechanical engineering"]. Kemerovo, 2011, pp. 112–115. (In Russian)
9. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdsti 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.
10. Skeebe V.Yu. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin, pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
11. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.
12. Plotnikova N., Losinskaya A., Skeebe V., Nikitenko E. Perspective of high energy heating implementation for steel surface saturation with carbon. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.351
13. Skeebe V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 88–94. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.88
14. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Plotnikova N.V., Lobanov D.V. Struktura iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii posle vysokoenergeticheskogo vozdeystviya TVCh [Structure of wear resistant plasma coatings after high-energy treatment using high-frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 11–18.
15. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "Diamond Smoothing". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 125, pp. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031
16. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Y., Bataev I.A., Lobanov D.V., Martyushev N.V., Sakha O.V., Khlebova I.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, pp. 012025. doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012025



17. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyskhin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126, pp. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016
18. Maebayashi M., Otsuka S., Matsuoka T., Koda S. Acoustic analysis of composite soft materials, II characterization of composite materials containing glass beads. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003. vol. 42, no. 5B, p. 2939. doi: 10.1143/JJAP.42.2939
19. Kari S., Berger H., Gabbert U., Guinovart-Diaz R., Bravo-Castillero J., Rodriguez-Ramos R. Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 3–4, pp. 684–691. doi: 10.1016/j.compscitech.2007.09.009
20. Yaroslavtsev V.M. Tekhnologicheskie resheniya problem obrabotki raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktii iz kompozitsionnykh materialov [Technological solutions to problems processing the rocket and aerospace composite structures]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering"*, 2005, no. S2, pp. 41–62.
21. Rudykh O.L., Melamed E.Sh. *Osnovy sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya stroitel'nykh konstruktii*. Ch. 2. *Vidy obespechenii SAPR (programmno-apparatnye sredstva)* [Fundamentals of computer-aided structural design. Pt. 2. Types of CAD software (firmware)]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 1998. 157 p.
22. Chu S., Yi W., Wang S., Li F., Feng W., Gong Q. Steady-state and transient-state optical properties of a charge-transfer composite material MO-PPV/SWNTs. *Chemical Physics Letters*, 2008, vol. 451, iss. 1–3, pp. 116–120. doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.087
23. Zheng Y., Yang J., Wang J., NuLi Y. Nano-porous Si/C composites for anode material of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, iss. 19, pp. 5863–5867. doi: 10.1016/j.electacta.2007.03.013
24. Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chen C.S., Hu Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 7–8, pp. 1087–1092. doi: 10.1016/j.wear.2008.02.015
25. Li J.L., Xiong D.S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 3–4, pp. 533–539. doi: 10.1016/j.wear.2007.09.005
26. Miyazaki H., Matsui H., Kitakaze H., Karuppuchamy S., Ito S., Yoshihara M. Synthesis and electronic behaviors of  $\text{Ce}_{0.5}\text{Hf}_{0.5}\text{O}_2$  / Carbon clusters composite material. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 113, iss. 1, pp. 21–25. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.087
27. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bol'sheshapova A.V. [Method of selection of composite materials instead of conventional structural]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the 4th International scientific-practical conference "Modern materials, equipment and technology"]. Kursk, 2014, pp. 255–261. (In Russian)
28. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Analiz i ratsional'nyi vybor polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya izdelii po ikh fiziko-mekhanicheskim svoistvam [Analysis and a rational choice of polymer composite materials for products based on their physical and mechanical properties]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 206–213.
29. Sidorenko S.A., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Programmnyi produkt dlya avtomatizatsii vybora ratsional'nogo kompozitsionnogo materiala [Software for automating choice of rational composite material]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2016, no. 3, pp. 30–36.
30. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Rychkov D.A. *DBCM v. 1.0 (programmy dlya EVM)* [DBCM v. 1.0 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016611925, 2015. (In Russian)
31. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Rychkov D.A. *SCM v. 1.0 (programmy dlya EVM)* [SCM v. 1.0 (software)]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016616679, 2016. (In Russian)
32. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 942–947. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.067
33. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S., Lobanov D.V. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, pp. 012077. doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012077

34. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Improve the application of the cutting tool during processing of composite non-metallic materials]. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii* [Proceedings of the 6th International Conference “Problems of mechanics of modern machinery”]. Moscow, 2015, pp 183–189. (In Russian)

#### **Funding**

The work is executed under the frame of the project “UMNIK” number 2015 0011203 “Development of the composite material product production preparation using the edge tool”.

#### **Article history**

Received 16 December 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 15 February 2017