

УДК 681.7.068

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-47-54

CAO/CAE-инженерное сопровождение производства малых предприятий

В.Ф. Булавин¹, Т.Г. Булавина¹, Д.В. Кошутин¹, И.С. Петряшов²

¹ Вологодский государственный университет

² АО «Вологодский оптико-механический завод»

CAO / CAE-Engineering Support for the Production of Small Enterprises

V.F. Bulavin¹, T.G. Bulavina¹, D.V. Koshutin¹, I.S. Petryashov²

¹ Vologda State University

² Vologda Optical and Mechanical Plant

Создание высокотехнологичных и наукоемких производств дает возможность проектирования изделий с высокими потребительскими качествами и выпуска глобально конкурентоспособной продукции. Новые тренды, связанные с цифровизацией конструкторско-технологических проектов, ускоряют интеграцию материального и виртуального производств. Динамичное окружение требует гибкости управления в условиях ускоренной адаптации производства. Такие вызовы предполагают долгосрочное прогнозирование и принятие быстрых решений при сохранении в перспективе конкурентоспособности товаров и услуг. Технологическая трансформация малых и средних предприятий в рамках перехода к цифровому производству обуславливает их объединение в пространство распределенных фабрик. Инновационные изменения в технологии производства сопровождаются внедрением эффективных бизнес-процессов на всех уровнях. Показано формирование группы компетенций, обеспечивающих объединение CAD/CAE/CAO в единый информационный поток данных, а также их распространение в сфере малых и средних машиностроительных предприятий. Единая система интеллектуальной модели бизнес-процессов обеспечивает поддержку параллельной работы разработчиков.

Ключевые слова: 3D-прототип, цифровое сопровождение, информационное поле, малые предприятия

The creation of high-tech and science based productions allows designing products with high consumer qualities and manufacturing globally competitive products. New trends associated with the digitalization of design and technological projects are accelerating the integration of material and virtual production. A dynamic environment requires the flexibility of management in the face of accelerated adaptation of manufacture. Such challenges involve long-term forecasting and making quick decisions while maintaining the competitiveness of goods and services over time. The technological transformation of small and medium-sized enterprises as part of the transition to digital production determines their integration into the space of distributed factories. Innovative changes in manufacturing technology are accompanied by the introduction of efficient business processes at all levels. The article considers the formation of a group of competencies ensuring the integration of CAD / CAE / CAO into a single information data flow, as well as their distribution in the field of small and medium-sized machine-building enterprises. A single system of intelligent business process model provides support for parallel work of developers.

Keywords: 3D prototype, digital support, information space, small enterprises

Стратегия развития промышленности опирается на виртуальное производство, составной частью которого являются малые и средние предприятия. Экономика нового технологического уклада предусматривает интеграцию средних и малых предприятий в общее виртуальное пространство на основе перехода к цифровому производству [1–3].

Единое информационное поле технологических бизнес-процессов реализуется программными средствами на базе платформ CAD/CAPP/CAM/CAE/CAO. Связанное с системами PDM/MES цифровое сопровождение свидетельствует о переходе предприятий к интеллектуальной модели функционирования и соединении материального и виртуального производств [1–4].

Цифровое конструкторско-технологическое обеспечение подготовки производства предполагает проектирование в формате электронных 3D-прототипов, автоматизированное технологическое обеспечение, моделирование и инженеринговый анализ отдельных деталей и узлов конструкции [5–10]. Комплексное применение технологий CAD/CAM/CAPP/CAE/CAO находится на этапе формирования, но его отдельные компоненты получили широкое распространение на предприятиях всех уровней.

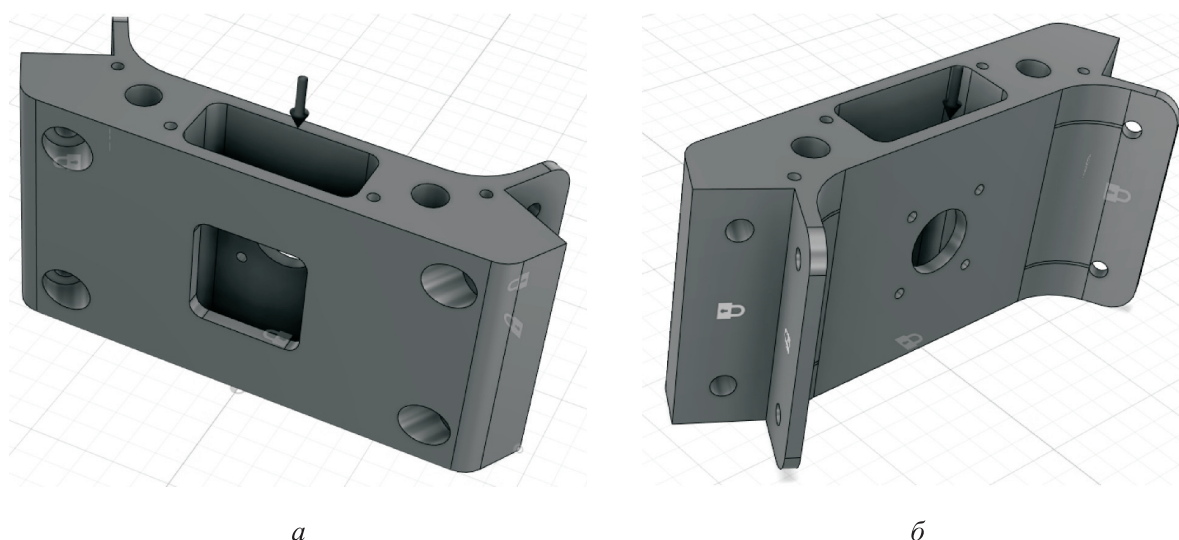
Цель работы — масштабирование в среде малых и средних предприятий компетенций в области CAE/CAO-проектирования, обеспечивающих объединение передовых производственных технологий и бизнес-моделей для них в единый информационный поток инженерных данных [7–10].

CAO-сопровождение производства. Топологический инженеринг, как составная часть цифрового проектирования, реализует стратегию определения геометрических характеристик изделия, при которых для несущих нагрузку областей путем перераспределения материала и уменьшения его массы обеспечивается сохранение силового профиля.

Применение деталей с оптимизированными геометрическими характеристиками является актуальным для машино-, автомобиле- и авиастроительной отраслей, где требуются как снижение массогабаритных параметров, так и сохранение функционала изделия.

Покажем процесс CAO-инжиниринга на примере детали «Уголок основания», используемой в конструкции настольного 3D-принтера по технологии FDM. Эта деталь выступает в качестве сопрягающего узла для опорных стоек и связывающих конструкцию стержней основания (рис. 1). К боковой поверхности детали прикреплен шаговый электродвигатель привода движения сопла по одной из координат. Технологию FDM-печати применяют как при прототипировании, так и в промышленном производстве из материалов ABS, PLA, HIPS, SBS, PVA.

Цифровой двойник изделия создается в CAD-платформе [7–10] и импортируется в CAO-модуль с использованием универсального формата, где формируется оптимизационная задача. На базе измеримых параметров (объема, массы, энергии деформации, напряжений в отдельных зонах и т. д.) создается целевая функция, и накладываются ограничения статиче-



а

б

Рис. 1. Модель исходной детали «Уголок основания»

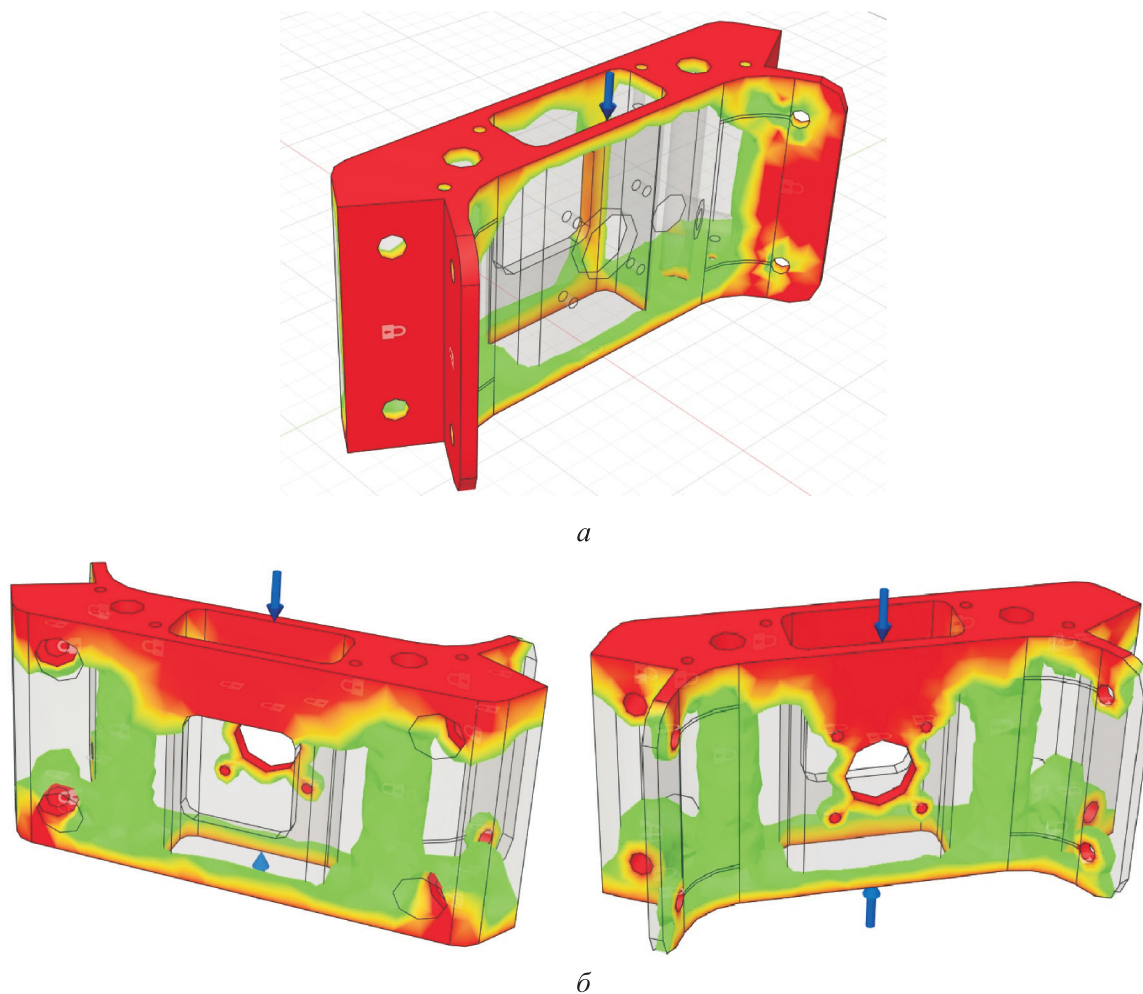


Рис. 2. Результаты оптимизации детали «Уголок основания» при некорректном (а) и корректном (б) указании базовых поверхностей

ской системы, включающие в себя технологические и геометрические факторы.

Конечно-элементное решение сформулированной задачи на базе итерационного алгоритма можно получить методом оптимального критерия или более сложным методом нелинейного оптимизатора.

В процессе определения области проектирования, где осуществляется поиск решения, назначаются базовые и крепежные поверхности детали, а также задается процентное отношение массы оптимизированной детали к массе исходной конструкции $m_{\text{отн}}$. При попытке получить слишком легкую деталь удовлетворительных решений может и не быть.

При некорректном указании базовых поверхностей материал не будет распределен на требуемые зоны, что отражено на рис. 2, а. Здесь центральная зона детали, предназначенная для доступа к шаговому электродвигателю, и его крепления, не заполнены материалом, а

периферийные области конструкции остались без изменений.

При корректном указании необходимых поверхностей, отверстий и отношения масс $m_{\text{отн}}$ можно получить несколько вариантов решения топологического инжиниринга, одно из которых показано на рис. 2, б. Анализ карты объемных долей и операция удаления из пространства проектирования зон с малой массой приводит к выявлению силовой схемы детали.

Новая конструкция представляет собой результат оптимизации при отношении масс $m_{\text{отн}} \approx 40\%$. Если полученное решение удовлетворяет конструкторскому заданию, то результат формируется как математическая модель на сетке конечных элементов, что требует выполнения операций сглаживания формы. Найденный результат топологической оптимизации методом оптимального критерия не является итоговым. Окончательную геометрическую форму изделия корректирует конструктор

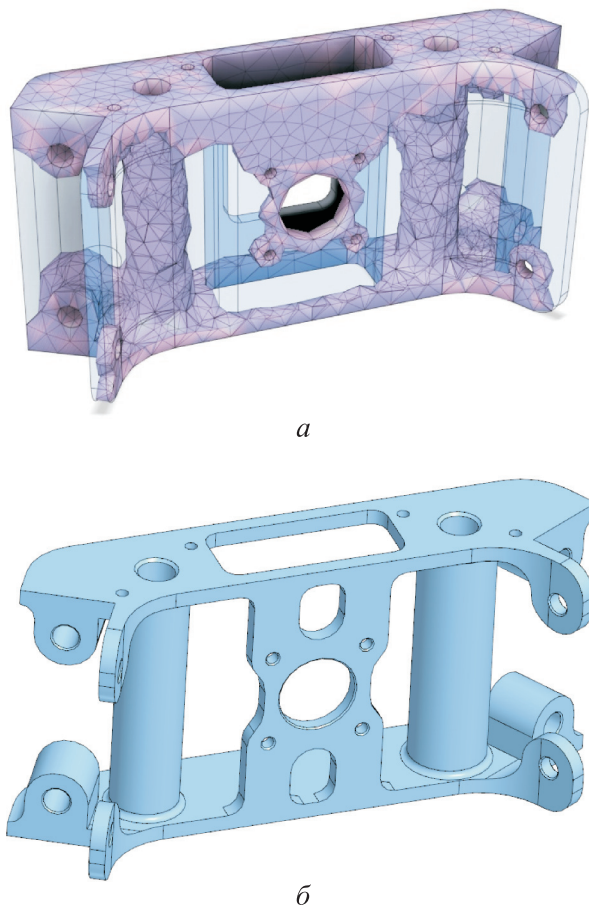


Рис. 3. 3D-прототипы оптимизированной (а) и сглаженной (б) деталей

средствами CAD. 3D-прототипы оптимизированной и отредактированной (сглаженной) деталей приведены на рис. 3, а и б.

Оптимизированные детали сложной геометрической формы целесообразно изготавливать большими партиями с применением методов литья и штамповки. Для малых и средних предприятий характерно мелкосерийное, единичное и позаказное производство.

С внедрением аддитивных технологий, связанных с послойным формированием объектов, а не с удалением или перераспределением материала, стало целесообразным развивать это направление для изготовления как единичных, так и малых партий деталей сложной топологии. Это достигается путем снижения числа технологических операций и быстрого перепрограммирования оборудования.

САЕ-сопровождение производства. Инжиниринг обеспечивает сопровождение проекта по

прочностным расчетам и проводится в САЕ-приложениях [11–16]. Платформа САЕ, реализующая конечно-элементную методологию, ориентирована на численный анализ напряженно-деформированного состояния стержневых, пластинчатых, оболочечных и твердотельных конструкций, а также их сборок, выполненных из отдельных 3D-прототипов.

Внешние нагрузки и ограничения могут различаться как по расположению, так и по содержанию [12, 13]. Силовой анализ позволяет на этапе проектирования найти конструктивные решения, отвечающие требованиям надежности и безопасности изделия при эксплуатации.

Валидацию детали с новыми геометрическими характеристиками выполняют путем проверочного прочностного моделирования в САЕ-приложении с учетом имеющихся воздействий. В статическом расчете основными нагрузками, действующими на элемент, являются реакции во всех крепежных отверстиях, момент сопротивления заторможенного электродвигателя, его масса и масса верхней части принтера.

Выбранная система загрузений, определяющая силовую схему, дополняется условиями закрепления детали в конструкции. Генерация сетки конечных элементов формирует корректную расчетную модель [12, 13].

Программа испытаний определяет узловые напряжения, перемещения и деформации, запас прочности и циклическую устойчивость элемента в конструкции. Материал изделия (акрил, HIPS) выбирают исходя из механических и экологических требований.

Визуализация результатов силового анализа детали, выполненной из акрила с пределом текучести $\sigma_t = 4,5 \cdot 10^7$ Н/м² и пределом прочности при растяжении $\sigma_{в.р} = 7,3 \cdot 10^7$ Н/м², после оптимизации в виде графических карт с учетом масштабного коэффициента приведена на рис. 4, а–г при отношении масс $m_{отн} = 58$ %.

Цветовое оформление, дополненное легендой величин, позволяет анализировать поля напряжений (максимальное значение $\max = 3,875 \cdot 10^7$ Н/м²), эквивалентной деформации ($\max = 8,446 \cdot 10^{-3}$), перемещений ($\max = 2,624 \cdot 10^{-1}$ мм) и запаса прочности (минимальное значение $\min = 2,2$) на предмет выявления опасных зон и сечений.

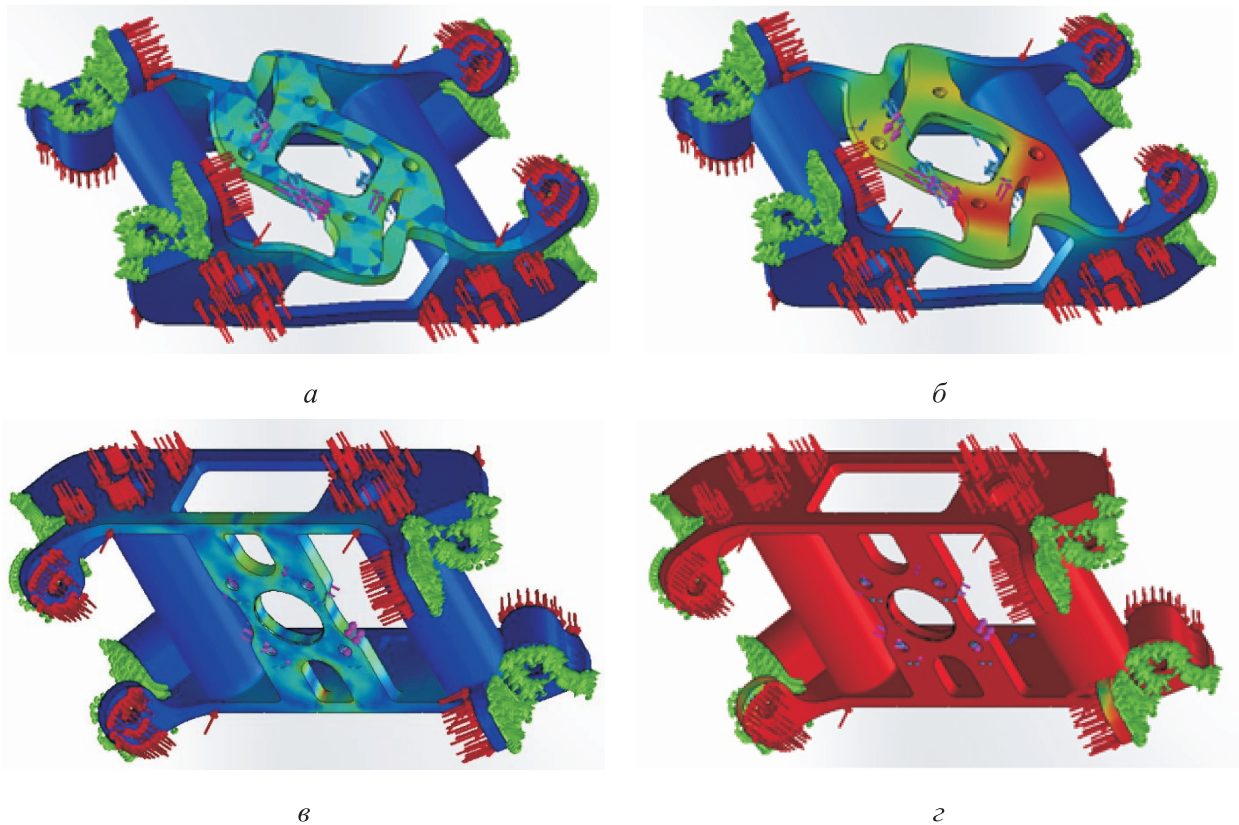


Рис. 4. Графические карты распределения узловых деформаций (а), перемещений (б), напряжений (в) и запаса прочности (г) в оптимизированной детали при отношении масс $m_{\text{отн}} = 58\%$

Максимальные значения узловых деформаций, перемещений и напряжений соответствуют наиболее уязвимым местам оптимизированного изделия и сконцентрированы в его центральной области, где закреплен затормо-

женный электродвигатель (аварийный режим). В случае наличия опасных зон необходима коррекция геометрических характеристик конструкции в CAD-платформе для исправления этих недостатков и уточнения характера

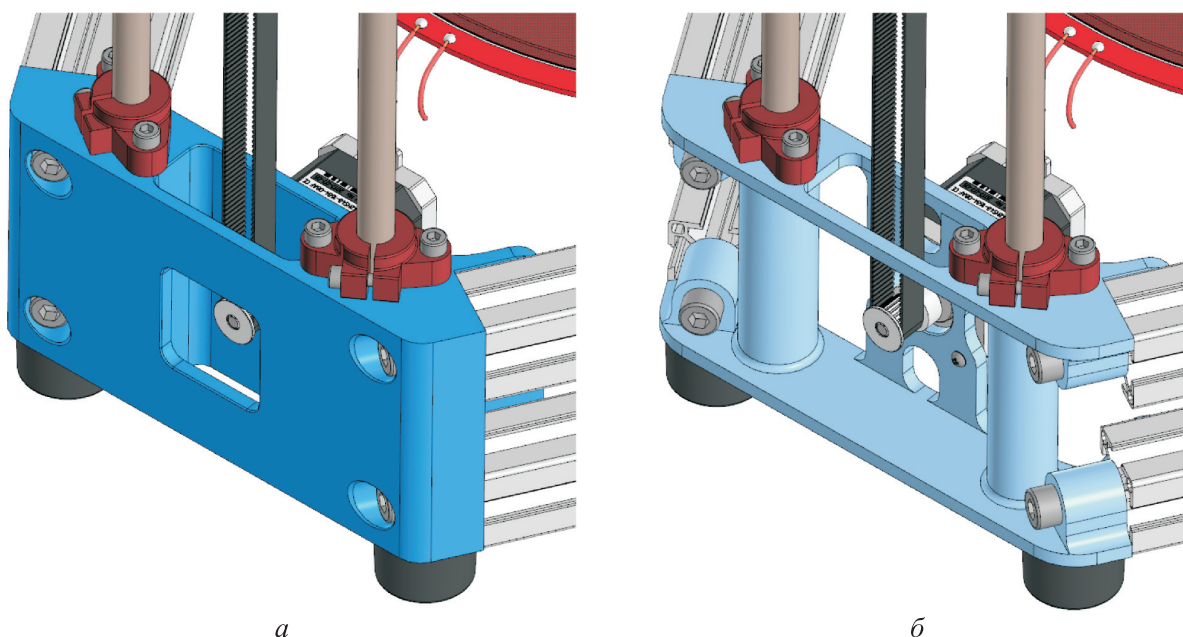


Рис. 5. Цифровая сборка узла настольного 3D-принтера с исходным (а) и оптимизированным (б) креплениями основания

нагрузок. Следует отметить, что процесс проектирования в САО/САЕ носит итерационный характер.

При определении реальных значений измеримых параметров их следует фиксировать не в точках максимумов, а на расстоянии одного–двух конечных элементов в стороне. Это связано с дискретностью расчетной модели и погрешностью, вносимой методом конечных элементов.

Для получения готового изделия в условиях мелкосерийного производства целесообразно применять аддитивные технологии или литье. Цифровая сборка узла настольного 3D-принтера с исходным и оптимизированным креплением основания показана на рис. 5. Новая конструкция обладает аналогичными эксплуатационными качествами, что и старая, но имеет меньшую материалоемкость.

Поток инженерных данных, формируемых в САД/САЕ/САО-приложениях, выступает звеном интеграции отдельных цифровых платформ в единое информационное поле PDM/MES-окружения [17, 18]. Технологии и алгоритмы функционирования внутри плат-

форм, взаимодействуя между собой, определяют интеллектуализацию производственной деятельности предприятий.

Выводы

1. Технологические инновации создают новые направления развития производства, отвечают росту конкурентоспособности и качества изделий, приводят к ускорению выпуска новых видов продукции. Цифровизация технологических процессов на малых предприятиях находит отражение во внедрении и активном использовании САД/САЕ/САО- и MES-платформ. Расширение компетенций разработчиков позволяет проектировать оборудование и приборы с пониженными материало-, энергоемкостью и высокими эргономическими показателями.

2. Использование высокотехнологичных программных средств формирует условия развития производств с цифровым сопровождением, что приводит к повышению автоматизации труда и росту кастомизированных товаров и услуг.

Литература

- [1] *Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии*. Москва, Сколково, 2017. 86 с.
- [2] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Перспективные направления развития передовых производственных технологий в России. *Мат. XVII Апрельской межд. науч. конф. По проблемам развития экономики и общества*. Т. 3. Москва, ВШЭ, 2017, с. 381–389.
- [3] Боровков А., Рябов Ю. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы. *Трамплин к успеху*, 2017, № 10, с. 8–11.
- [4] Digital Spillover. Measuring the real impact of the digital economy. *huawei.com: веб-сайт*. URL: https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf (дата обращения: 07.01.2022).
- [5] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Кошутин Д.В. и др. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 15–29, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-15-29>
- [6] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. и др. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. I. Конструкторский этап. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2020, т. 63, № 3, с. 242–249, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-242-249>
- [7] Булавин В.Ф., Яхричев В.В. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли. *САПР и графика*, 2018, № 6, с. 52–55.
- [8] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Валидация САД-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2017, № 5, с. 64–72.
- [9] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrichev V.V. Design of ultrasonic auxiliary equipment. *Proc. ICIE 2021*. Springer, 2022, pp. 9–16, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_2
- [10] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Трансформация технологического обеспечения малых предприятий машиностроения. *Цифровая экономика и индустрия 4.0: Форсайт Россия. Сб. тр. науч.-практ. конф.* Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2020, с. 28–40.

- [11] Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Инженерный анализ и новые технологии в методе конечных элементов. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2018, № 2, с. 109–120.
- [12] Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в Solid Works Simulation*. Москва, ДМК-Пресс, 2010. 464 с.
- [13] Замрий А.А. *Практический учебный курс. CAD/CAE система ARM WinMachine*. Москва, ДМК-Пресс, 2007. 144 с.
- [14] Bulavin V.F., Bulavin V.F., Bulavina T.G. et al. Digital design and technological innovation in the small machine building sector. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 939, art. 012016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012016>
- [15] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. *Proc. ICIE 2020*. Springer, 2021, pp. 462–468, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_54
- [16] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V., et al. Digital support of production small business preparation in engineering. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, no. 3, art. 033045, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033045>
- [17] Ширяев Н. PLM/PDM/ERP: реалии и перспективы. *САПР и графика*, 2007, № 12, с. 16–20.
- [18] Личман А. Интеграция PLM и ERP: Выбор пути. *Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка)*, 2013, № 3, с. 84–85.

References

- [1] *Tsifrovoye proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital production. Methods, ecosystems, technologies]. Moscow, Skolkovo Publ., 2017. 86 p. (In Russ.).
- [2] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Promising area for developing of advanced manufacturing technologies in Russia]. *Mat. XVII Aprel'skoy mezhd. nauch. konf. Po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva*. T. 3 [Proc. XVII April Int. Sci. Conf. On Development Problems of Economics and Society. Vol. 3]. Moscow, VShE Publ., 2017, pp. 381–389. (In Russ.).
- [3] Borovkov A., Ryabov Yu. On «Tekhnet» roadmap (advanced manufacturing technologies) of national technology initiative. *Tramplin k uspekhu*, 2017, no. 10, pp. 8–11. (In Russ.).
- [4] Digital spillover. Measuring the real impact of the digital economy. *huawei.com: website*. URL: https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf (accessed: 07.01.2022).
- [5] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V. et al. Digital transformation of technological support of production in small enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 9, pp. 15–29, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-15-29> (in Russ.).
- [6] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. et al. Digital format for preparation of instrument production. Part I. Design stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2020, t. 63, no. 3, pp. 242–249, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-242-249> (in Russ.).
- [7] Bulavin V.F., Yahrachev V.V. Digital technologies in small business of the engineering industry. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics], 2018, no. 6, pp. 52–55. (In Russ.).
- [8] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. Validation of CAD products in small enterprises machinery sector. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2017, no. 5, pp. 64–72. (In Russ.).
- [9] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. Design of ultrasonic auxiliary equipment. lecture notes in mechanical engineering. *Proc. ICIE 2021*. Springer, 2022, pp. 9–16, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_2
- [10] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. [Digital innovations for small entrepreneurship mechanical engineering]. *Tsifrovaya ekonomika i industriya 4.0: Forsayt Rossiya. Sb. tr. nauch.-prakt. konf.* [Digital Economics and industry 4.0. Foresight Russia. Proc. sci.-pract. conf.]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2020, pp. 28–40. (In Russ.).
- [11] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrachev V.V. Engineering analysis and new technologies in the finite element method. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*

- [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 2, pp. 109–120. (In Russ.).
- [12] Alyamovskiy A.A. Inzhenernye raschety v Solid Works Simulation [Engineering calculation in Solid Works Simulation]. Moscow, DMK-Press Publ., 2010. 464 p. (In Russ.).
- [13] Zamriy A.A. Prakticheskiy uchebnyy kurs. CAD/CAE sistema ARM WinMachine [Practical study course. CAD/CAE ARM WinMachine system]. Moscow, DMK-Press Publ., 2007. 144 p. (In Russ.).
- [14] Bulavin V.F., Bulavin V.F., Bulavina T.G. et al. Digital design and technological innovation in the small machine building sector. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 939, art. 012016, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012016>
- [15] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Stepanov A.S. Digital space of small enterprises in engineering. *Proc. ICIE 2020*. Springer, 2021, pp. 462–468, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_54
- [16] Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrchev V.V., et al. Digital support of production small business preparation in engineering. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1399, no. 3, art. 033045, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033045>
- [17] Shiryayev N. PLM/PDM/ERP: realities and prospects. *SAPR i grafika* [CAD and Graphics], 2007, no. 12, pp. 16–20. (In Russ.).
- [18] Lichman A. Integration of PLM and ERP: choice of method. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov (metalloobrabotka)*, 2013, no. 3, pp. 84–85. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 07.03.2022

Информация об авторах

БУЛАВИН Вячеслав Федорович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: bulavin35@mail.ru).

БУЛАВИНА Тамара Георгиевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: tamarabulavina53@gmail.com).

КОШУТИН Дмитрий Валерьевич — старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения». Вологодский государственный университет (160000, Вологда, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 15, e-mail: koshutindv@mail.ru).

ПЕТРЯШОВ Игорь Сергеевич — технолог. АО «Вологодский оптико-механический завод» (160009, Вологда, Российская Федерация, ул. Мальцева, д. 54, e-mail: toolzz@yandex.ru).

Information about the authors

BULAVIN Vyacheslav Fedorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 15, e-mail: bulavin35@mail.ru).

BULAVINA Tamara Georgievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 15, e-mail: tamarabulavina53@gmail.com).

KOSHUTIN Dmitry Valeryevich — Senior Lecturer, Department of Engineering Technologies. Vologda State University (160000, Vologda, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 15, e-mail: koshutindv@mail.ru).

PETRYASHOV Igor Sergeevich — Technologist. Vologda Optical and Mechanical Plant (160000, Vologda, Russian Federation, Maltseva St., Bldg. 54, e-mail: toolzz@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Булavin В.Ф., Булавина Т.Г., Кошутин Д.В., Петряшов И.С. CAO/CAE-инженерное сопровождение производства малых предприятий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 47–54, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-47-54

Please cite this article in English as:

Bulavin V.F., Bulavina T.G., Koshutin D.V., Petryashov I.S. CAO/CAE-Engineering Support for the Production of Small Enterprises. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 47–54, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-47-54