



УДК 621.74.002.6:681.3

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-140-147

Оригинальная статья
Original article

ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

С. В. Князев¹, А. И. Куценко¹, А. А. Усольцев¹,
Н. А. Козырев², А. А. Куценко¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)

✉ krookia@mail.ru

Аннотация. Время информационных технологий определяет свои приоритеты, которые являются обязательным условием построения конкурентоспособного производства и экономики. Повсеместное распространение цифровизации – один из базовых признаков новой экономики, нового типа социально-экономического устройства, постепенно формируемого в современном мире путем внедрения достижений научно-технического прогресса и инновационных методов хозяйствования, интеллектуализации и капитализации человеческих знаний, использования передовых новейших информационных и материальных технологий, ускоренного развития наукоемких отраслей экономики, становления творческого, эффективного, рационального информационно-материального производства. В настоящее время на крупных литейных предприятиях с массовым и крупносерийным производством отливок в целом решена задача автоматизации управления технологическими процессами с использованием цифровых систем управления. Они реализуют алгоритмы управления технологическими процессами литья в замкнутых контурах (локально). Рассматриваемые системы позволяют реализовывать оптимальные стратегии управления и автоматически выполнять последовательности операций (пуск и остановку оборудования; расчет и ввод металлошхты; расчет рецептур, дозирование и смешивание формовочных и стержневых смесей) многостадийных периодических литейных процессов. Цифровая трансформация может существенно изменить сложившуюся практику работы литейного производства (от непосредственного контроля и управления технологическими процессами до бизнес-планирования и документооборота). Трансформация окажет влияние на все параметры предприятия: экономическую эффективность производства (производительность, эксплуатационные затраты); надежность (эксплуатационную готовность); безопасность (количество инцидентов); соответствие законодательным нормам по экологии. Технологическим критерием успешности цифровой трансформации литейного производства будет являться выпуск номенклатуры отливок с минимальным уровнем дефектности, коммерческим – выпуск номенклатуры отливок, пользующихся спросом на рынке (детали машин и механизмов), с минимальной себестоимостью, которая определяется технологическим уровнем подготовки производства и его реализацией и, как следствие, низкими затратами и оптимальным качеством форм, металла и отливок.

Ключевые слова: литейное производство, технология, управление, цифровизация, трансформация, качество, эффективность, контроль, система

Для цитирования: Князев С.В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Куценко А.А. Перспективы и направления цифровой трансформации в литейном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):140–147.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-140-147>

PROSPECTS AND DIRECTIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN FOUNDRY

S. V. Knyazev¹, A. I. Kutsenko¹, A. A. Usol'tsev¹,
N. A. Kozyrev², A. A. Kutsenko¹¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

✉ krookia@mail.ru

Abstract. The time of information technology determines its priorities, which are a prerequisite for building a competitive production and economy. The ubiquitous spread of digitalization is one of the basic principles of new economy, a new type of socio-economic structure that is gradually being

formed in the modern world through the introduction of scientific and technological progress and innovative methods of management, intellectualization and capitalization of human knowledge, the use of advanced new information and material technologies, accelerated development of knowledge-intensive sectors of the economy, the formation of creative, efficient, rational information and material production. Currently, at large foundries with mass and large-scale production of castings, the task of automating the control of technological processes using digital control systems was solved in general. They implement algorithms for controlling technological processes of casting in closed circuits (locally). The systems under consideration allow to implement optimal control strategies and automatically perform sequences of operations (start and stop of equipment; calculation and input of metal charge; calculation of formulations, dosing and mixing of molding and core mixtures) of multi-stage periodic casting processes. Digital transformation can significantly change the established practice of foundry production (from direct control and management of technological processes to business planning and document management). The transformation will have an impact on all parameters of the enterprise: economic efficiency of production (productivity, operating costs); reliability (operational readiness); safety (number of incidents); compliance with legislative norms on ecology. The technological criterion for success of the digital transformation of foundry production will be the release of a nomenclature of castings with a minimum level of defect, commercial – the release of a nomenclature of castings in demand on the market (machine parts and mechanisms), with a minimum self-cost, which is determined by the technological level of preparation of the production and its implementation and, as a consequence, low costs and optimal quality of molds, metal and castings.

Keywords: foundry, technology, management, digitalization, transformation, quality, efficiency, control, system

For citation: Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Kutsenko A.A. Prospects and directions of digital transformation in foundry. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):140–147. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-140-147>

ВВЕДЕНИЕ

Современное производство характеризуется своей гибкостью не только в технологической сфере, но и способностью адаптировать свою бизнес-модель и стратегию под меняющиеся условия.

Цифровая трансформация – это интеграция IT- и digital-технологий во все процессы предприятия. Их внедрение заключается не только в использовании современного оборудования, но и в модернизации подходов к управлению [1; 2]. Прогресс достигается путем отказа от консервативных моделей работы, а также за счет их преобразования.

Цифровая трансформация должна базироваться на современных информационно-материальных технологиях и оборудовании, начинаться с модернизации верхнего уровня управления предприятием – ERP системы (планирование, материальные потоки и финансы, персонал, коммуникации и другое), повышения уровня «цифровых» технологических компетенций и мышления сотрудников, адаптации и обучения их к нововведениям, современному стилю управления и работы, вовлечения и стимулирования их в процесс перехода на современные этапы развития производства [3 – 5].

Цифровая трансформация касается любого направления деятельности предприятия. Создание и хранение BigData (результаты анализов, снимки), протелевидение, приборы удаленного мониторинга состояния оборудования и мобильные приложения по контролю производства меняют подход к промышленным технологиям.

Одна из ключевых функций цифрового производства – это контроль и идентификация [6 – 8]. Такой подход позволяет организовать более гибкий производственный процесс, вплоть до индивидуального изделия. Однако цифровое производство подразумевает под собой не только контроль и идентификацию продукции, но также электронные библиотеку, журналы и паспорта изделий; онлайн цифровой контроль с последующей математической обработкой результатов и их анализом; создание

специальных платформ по контролю за эксплуатацией изделий (обратная связь); прогнозирование и техническую диагностику качества продукции [9 – 11].

В результате анализа мнения российских [12 – 14] и зарубежных [15 – 18] экспертов можно выделить четыре приоритета цифровой трансформации в промышленности:

- исключение человека из рутинных и опасных производственных процессов;
- создание цифровых двойников;
- управление и распределение ресурсами;
- организация современной культуры коммуникаций.

Под цифровые двойники попадают оптимизация энергопотребления и ресурсное планирование производства, цепочки поставок, техническое обслуживание и ремонт, модели этапов технологических процессов.

Задачи цифровой трансформации литейного производства

Процесс цифровой трансформации в литейном производстве еще находится на ранней стадии. Степень адаптации цифровых технологий с точки зрения реализации их бизнес-потенциала можно экспертно оценить примерно в 20 %.

В настоящее время на крупных литейных предприятиях в целом решена задача автоматизации управления технологическими процессами с использованием цифровых АСУ ТП. Они позволяют вести управление процессами в замкнутом контуре (локально) по определенным алгоритмам, реализовывать оптимальные стратегии управления с применением систем усовершенствованного управления и автоматически выполнять последовательности операций (пуск и остановку оборудования; расчет и ввод металлошихты; расчет рецептур, дозирование и смешивание формовочных и стержневых смесей) многостадийных периодических литейных процессов.

В отличие от автоматизации технологического процесса задачи управления производством в массе своей не автоматизированы. В перечень задач управления производством входят, например, подготовка и контроль выполнения производственных планов, задачи оптимизации и контроля производственных режимов, диагностики и прогнозирования дефектности, задачи контроля состояния основного оборудования, вопросы безопасности и надежности оборудования, вопросы безопасности персонала, контроля выбросов и множество других [12 – 14]. Это связано с разнообразием таких задач, недостаточным внедрением систем, позволяющих автоматизировать их выполнение, недостаточным количеством исходных данных для работы таких систем, а также неполной интегрированностью существующего программного обеспечения между собой [15 – 18]. Рассматривая их по аналогии с задачами автоматизации технологических процессов, можно утверждать, что большая часть задач управления производством выполняется в ручном режиме, а не в замкнутом контуре. Цифровая трансформация позволит «замкнуть» этот контур и обеспечить выполнение таких задач в автоматизированном режиме. Имея всю полноту данных о производстве в реальном времени и в архиве истории, сотрудники предприятия будут применять аналитические приложения (общецелевые или специализированные) для выработки решений и их исполнения. В этих целях могут быть подключены отраслевые эксперты, у которых также будет доступ к необходимой информации. Контроль выполняемых решений осуществляется на основании данных реального времени, автоматически полученных из АСУ ТП и других источников.

Другая группа задач, где цифровая трансформация может существенно изменить сложившуюся практику работы литейного производства, – это задачи, непосредственно подразумевающие работу в опасных зонах предприятия и на удаленных объектах. К таким задачам относятся обходы полевых операторов, контроль состояния оборудования, техническое обслуживание, ремонт оборудования и КИП. Новые подходы позволяют не только получить доступ к информации, ранее недоступной для сотрудников, находящихся в опасных зонах, но и сократить количество выходов в такие зоны.

Важным аспектом цифровой трансформации в литейном производстве является принципиальное изменение бизнес-процессов, связанных с реализацией готовой продукции потребителям. Так как среди крупных рыночных игроков часто выступают госкорпорации, транснациональные компании, крупные объединения (многие из них уже более трех лет занимаются цифровой трансформацией в основных сферах своей деятельности), то в ближайшем будущем они как заказчики будут покупать продукцию, технологии, услуги только у тех производителей, которые смогут интегри-

роваться в их цифровые платформы. Только в этом случае поставщики станут актуальны для стратегического развития заказчиков.

Литейное производство – это заготовительное производство, которое включает в себя совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, направленных на обеспечение машиностроения, приборостроения и других отраслей народного хозяйства литыми заготовками и изделиями.

В ближайшем будущем в рамках цифровой трансформации каждое литое изделие будет иметь цифровой паспорт (*Digital Passport*), в котором хранится весь жизненный цикл продукта. В общем виде информация о литом изделии будет включать в себя следующее [19; 20]:

- уникальный номер изделия, по которому происходит идентификация серийного номера изделия и выводится персональная информация по конкретному экземпляру;

- технические характеристики изделия (паспорт изделия);

- используемые материалы и/или компоненты, применяемые при производстве изделия;

- перечень оборудования, на котором произведено изделие с указанием всех параметров технологической цепочки его производства, включая непосредственных исполнителей (смен, бригад, конкретных работников в зависимости от технологической операции), осуществлявших выпуск изделия;

- результаты испытаний, диагностики на каждом технологическом этапе производства изделия;

- сведения о методах и средствах контроля качества изделия с указанием полученных в ходе данных операций результатов;

- сведения о дефектах, восстановительных и технологических ремонтах по всей цепочке кооперации изготовления изделия;

- условия хранения и эксплуатации изделия;

- условия уничтожения, утилизации или переработки изделия.

Рассматриваемый подход обеспечит прямую связь с потребителем, наладит оперативный электронный документооборот изготавливаемой продукции, исключит контрафакт и подделку продукции, выявит возможные причины отказа и поломки изделия в составе оборудования, позволит прогнозировать его техническое состояние и резко повысит уровень управления качеством. Создается рабочее *Online* пространство для оперативного обмена достоверной документацией с заводом-производителем и взаимодействия поставщика с заказчиками [21 – 23]. Помимо этого, производитель получает значительный объем аналитической информации, при грамотном использовании которого он сможет удерживать затраты на производство литого изделия на низком (конкурентном) уровне [24].

**ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ЛИТЕЙНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Цифровая трансформация в литейном производстве – это объективная необходимость «выживания» всей отрасли в целом, требующая применения современных цифровых инструментов на всех переделах изготовления отливок (см. таблицу).

Среди отраслей экономики, в которых в первую очередь будет происходить цифровая трансформация литейного производства, – это автомобиле-, авиа-, судно- и корабле-, двигателе-, машиностроение (атомное, нефтегазовое, тяжелое, специальное), железнодорожный транспорт.

Таким образом, уже сейчас литейным предприятиям необходимо начать разработку стратегии цифровой трансформации своего производства, в которой следует учесть следующие важные аспекты:

– цифровизацию процессов (данные решения должны упростить технологические процессы производства, техническое обслуживание и ремонт оборудования, административные процессы; сюда же должны входить мобильные решения для рабочего персонала);

– роботизацию и автоматизацию (решения, позволяющие снизить или исключить участие человека в некритичных процессах, а также решения, улучшающие контроль и стабильность производственных процессов);

– пооперационный контроль качества готовой продукции (решения, позволяющие сформировать систему учета и идентификации готовой продукции на предприятии, разработать цифровой паспорт *Digital Passport* изделия);

– системное управление активами предприятия (решения, направленные на организацию взаимодейст-

Цифровые инструменты литейного производства

Digital foundry tools

Технологическо-организационные операции	Цифровые инструменты
Подготовка производства, технология литейной формы и модельно-опочная оснастка [25 – 27]	– создание компьютерной 3D-модели отливки в системах трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования; – проектирование литниковой системы, моделирование и оптимизация процессов литья на базе систем LVMFlow, ProCAST; – компьютерное моделирование, виртуальные испытания, цифровые двойники (DTA); – подготовка комплекта чертежей литейной технологии на базе CAD-систем; – аддитивные технологии (AT); – технологическое проектирование на базе CAM-систем; – применение станков с ЧПУ.
Процессы формообразования и изготовления стержней [28 – 30]	– роботизированная автоматизация процессов (RPA); – АФЛ и стержневые автоматы.
Шихтовка, плавка металла и заливка литейных форм [31; 32]	– роботизированная автоматизация процессов (RPA); – аналитика данных в цепях поставок; – «умный» склад (SW).
Финишные операции получения отливок (охлаждение, выбивка, обрубка и зачистка, устранение дефектов отливки, термическая обработка) [33; 34]	– роботизированная автоматизация процессов (RPA); – компьютерное зрение (CV); – дистанционное цифровое управление (RCU).
Обслуживание и ремонт [35]	– дополненная реальность (AR); – виртуальный помощник (VH).
Складирование, хранение, закупка и реализация, утилизация и рециклинг [36]	– «умный» склад (SW); – управление жизненным циклом изделия или продукции (<i>Smart Design</i>).
Контроль качества [37 – 40] и оптимизация производства [41 – 43]	– цифровой пооперационный контроль производства продукции; – цифровой паспорт изделия (DPP); – технологии <i>block chain</i> ; – рекомендательные и интеллектуальные системы поддержки принятия решений (DSS); – продвинутая бизнес-аналитика (BI); – искусственный интеллект и машинное обучение (AI&ML); – цифровые бизнес-сервисы и приложения для управления и мониторинга производственными и иными процессами.

вия в единой информационной системе производителя, поставщиков и потребителей);

– продвинутая аналитика и искусственный интеллект (решения, связанные с диагностикой и прогнозированием технологических, производственных и бизнес-процессов, создание интеллектуальных систем динамического управления процессами).

Выводы

Технологическим критерием успешности цифровой трансформации литейного производства будет являться выпуск номенклатуры отливок с минимальным уровнем дефектности, коммерческим критерием – выпуск номенклатуры отливок, пользующихся спросом на рынке (детали машин и механизмов) с минимальной себестоимостью, которая определяется технологическим уровнем подготовки производства и его реализацией и, как следствие, низкими затратами и оптимальным качеством форм, металла и отливок, переходом от ревизионной к постоянной оптимизации бизнес-процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Изотова А.Г., Комолова Т.О., Близнава А.С. Методы цифровой трансформации и внедрения искусственного интеллекта на производства. *Аллея науки*. 2020;1(4(43)):188–192.
Izotova A.G., Komolova T.O., Bliznova A.S. Methods of digital transformation and implementation of artificial intelligence in production. *Alleya nauki*. 2020;1(4(43)):188–192. (In Russ.).
2. Koshelev A.S. Digital economy: Prospects for digital transformation in Russia. В кн.: *Язык в сфере профессиональной коммуникации. Материалы международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и студентов. Екатеринбург, 28 мая 2020 г.* / Под ред. Л.И. Корнеева. Екатеринбург: ООО «Издательский Дом «Ажур»; 2020:49–54.
Koshelev A.S. Digital economy: Prospects for digital transformation in Russia. In: Korneev L.I. ed. *Language in professional communication. Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf. of Lecturers, Postgraduates and Students. Yekaterinburg, May 28, 2020*. Yekaterinburg: Azhur; 2020:49–54. (In Russ.).
3. Белов В.Д. Цифровые технологии в литейном производстве России. *Литейщик России*. 2019;(10):37–40.
Belov V.D. Digital technologies in Russian foundry. *Liteishchik Rossii*. 2019;(10):37–40. (In Russ.).
4. Перевод литейного производства на цифровые технологии – это новая идеология. *Станкоинструмент*. 2019;3(16):120.
Transfer of foundry to digital technologies as a new ideology. *Stankoinstrument*. 2019;3(16):120. (In Russ.).
5. Ткаченко С.С., Емельянов В.О., Мартынов К.В. К вопросу об интеграции литейного производства в цифровую экономику. *Арматуростроение*. 2020;4(127):42–44.
Tkachenko S.S., Emel'yanov V.O., Martynov K.V. On integration of foundry into digital economy. *Armaturostroenie*. 2020;4(127):42–44. (In Russ.).
6. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgopolov A.E. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;150:012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012039>
7. Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Dolgopolov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;150:012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012026>
8. Князев С.В., Скопич Д.В., Фатьянова Е.А., Усольцев А.А., Куценко А.И. Программно-аппаратный комплекс автоматизированной системы неразрушающего контроля дефектности отливок. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(2):134–140. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-2-134-140>
Knyazev S.V., Skopich D.V., Fat'yanova E.A., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.I. Software and hardware automated system of casts defects non-destructive monitoring. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(2):134–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-2-134-140>
9. Штейн А.М., Чепрасов А.И., Клименов В.А., Князев С.В., Чахлов С.В., Белкин Д.С. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства. *Известия вузов. Физика*. 2013;56(1-2):267–270.
Shtein A.M., Cheprasov A.I., Klimenov V.A., Knyazev S.V., Chakhlov S.V., Belkin D.S. Continuous control of large-sized foundry products. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2013;56(1-2):267–270. (In Russ.).
10. Князев С.В., Скопич Д.В., Фатьянова Е.А., Усольцев А.А., Куценко А.И. Ключевые показатели качества сталелитых изделий для железнодорожного транспорта. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(2):128–132. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-2-128-132>
Knyazev S.V., Skopich D.V., Fat'yanova E.A., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.I. Key indicators of steel quality of cast products for railway transport. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(2):128–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-2-128-132>
11. Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., etc. Software and hardware for integrated aces of casting quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/866/1/012034>
12. Абрамов В.И., Кашироков А.С. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации ЖКХ. В кн.: *Цифровая экономика и финансы: материалы IV Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 18–19 марта 2021 г.* Санкт-Петербург: Центр научно-производственных технологий «Астерион»; 2021:139–143.
Abramov V.I., Kashirokov A.S. Digital twins – effective tools of digital transformation of housing and communal services. In: *Digital Economy and Finance: Proceedings of the IV Int. Sci. and Pract. Conf. St. Petersburg, March 18–19, 2021*. St. Petersburg: Asterion; 2021:139–143. (In Russ.).
13. Алешкин Н.А., Беспалова С.Е. Технология цифровых двойников как элемент цифровой трансформации промышленности. В кн.: *Прорывные научные исследования*

- как двигатель науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Магнитогорск, 27 февраля 2021 г. Уфа: ООО «ОМЕГАСАЙНС». 2021:26–29.
- Aleshkin N.A., Bepalova S.E. Technology of digital twins as an element of digital transformation of industry. In: *Breakthrough Scientific Research as the Engine of Science: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. Magnitogorsk, February 27, 2021*. Ufa: OMEGASAINS; 2021:26–29. (In Russ.).
14. Грошев И.В., Жерегеля А.В. Цифровая трансформация экономики: изменение бизнес-практики и цифровое лидерство. *Менеджмент в России и за рубежом*. 2021;3:10–17.
Groshev I.V., Zheregelya A.V. Digital transformation in economy: Changing business practices and digital leadership. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2021;3:10–17. (In Russ.).
 15. Biryuk D.V. Higher education institutions in the digital economy era: Digital transformation of higher education. *Gaudeamus Igitur*. 2020;1:53–55.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4309823>
 16. Soto Setzke D., Riasanow T., Böhm M., Krčmar H. Pathways to digital service innovation: The role of digital transformation strategies in established organizations. *Information Systems Frontiers*. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10796-021-10112-0>
 17. Crupi A., Del Sarto N., Di Minin A., Lepore D., Marinelli L., Spiragelli F. The digital transformation of SMEs – a new knowledge broker called the digital innovation hub. *Journal of Knowledge Management*. 2020;24(6):1263–1288.
<https://doi.org/10.1108/JKM-11-2019-0623>
 18. Bogatyreva Y., Privalov A., Romanov V., Lapina M. Development of competences of the digital economy of teachers in the conditions of digital transformation education. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020:147–157.
 19. Ershova T.V. Methodology for digital economy development assessment as a tool for managing the digital transformation processes. In: *Proceedings of the 11th Int. Conf. "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences Moscow; 2018:8551846.
<https://doi.org/10.1109/MLSD.2018.8551846>
 20. Pankratov D.L., Gavariyev R.V. Improving the quality of castings made of non-ferrous metal alloys when casting in metal molds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;570:012072.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/570/1/012072>
 21. Еронько С.П., Ошовская Е.В., Ющенко М.В., Стародубцев Б.И. Экспериментальные исследования рабочих параметров спиральных шнеков для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(9):33–40.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-9-33-40>
Eron'ko S.P., Oshovskaya E.V., Yushchenko M.V., Starodubtsev B.I. Experimental researches of working parameters of spiral screws for dispensing of slagging mixtures in molds of continuous casting machines. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(9):33–40. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-9-33-40>
 22. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонок Л.Ю. Управление процессом сварки в роботизированных технологических комплексах по критерию качества производимой продукции. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019;20(1):29–33. <https://doi.org/10.17587/mau.20.29-33>
Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Fominykh D.S., Bogomolov A.S., Filimonuk L.Yu. Controlling the welding process in robotic technological complexes by the criterion of product quality. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2019;20(1):29–33.
<https://doi.org/10.17587/mau.20.29-33>
 23. Zhang W., Cheng L., Liu J., etc. A survey of optimal hardware and software mapping for distributed integrated modular avionics systems. *Applied Sciences*. 2020;10(8):2675.
<https://doi.org/10.3390/AP10082675>
 24. Voytyuk I.N., Kopteva A.V., Skamyin A.N. Software and hardware complex for ore quality control on a belt conveyor. In: *2020 2nd Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020*. 2020:762–765.
<https://doi.org/10.1109/SUMMA50634.2020.9280715>
 25. Титов А.В., Гладких И.В. Обзор возможностей современных компьютерных комплексов подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ в производстве литейной оснастки. В кн.: *Инновационные технологии в образовательной деятельности. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Нижний Новгород, 5 февраля 2019 г.* Нижний Новгород: изд. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; 2019:138–144.
Titov A.V., Gladkikh I.V. Overview of capabilities of modern computer systems for preparation of control programs for CNC machines in production of foundry pattern equipment. In: *Innovative Technologies in Educational Activities: Materials of the All-Russ. Sci. and Method. Conf., Nizhny Novgorod, February 05, 2019*. Nizhny Novgorod: R.E. Alekseev NSTU; 2019:138–144. (In Russ.).
 26. Калиниченко М.Л., Долгий Л.П., Калиниченко В.А. Современные технологии изготовления оснастки для мелкосерийного литейного производства. *Литейное производство*. 2020;(3):18–21.
Kalinichenko M.L., Dolgii L.P., Kalinichenko V.A. Modern technologies for production of equipment for small-scale foundry. *Liteinoe proizvodstvo*. 2020;(3):18–21. (In Russ.).
 27. Мустаев И.З., Иванов В.Ю., Кандаров И.В., Муфтахова Н.А., Мустаев Т.И. Оценка эффективности производства литейной оснастки для деталей авиационных двигателей. *Вестник машиностроения*. 2019;(4):86–87.
Mustaev I.Z., Ivanov V.Yu., Kandarov I.V., Muftakhova N.A., Mustaev T.I. Evaluation of the production effectiveness of casting equipment for aircraft engine parts. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019;(4):86–87. (In Russ.).
 28. Жуковский С.С. Современные процессы изготовления стержней в литейном производстве России. *Литейщик России*. 2011;(9):20–27.
Zhukovskii S.S. Contemporary processes of core manufacturing in cast production in Russia. *Liteishchik Rossii*. 2011;(9):20–27. (In Russ.).
 29. Воронов Г.А. Совершенствование системы автоматизации процесса формообразования для изготовления отливок машиностроительного назначения. *Машинобудовання: Збірник наукових праць*. 2013;(12):71–76.

- Voronov G.A. Improvement of system of automation of the molding process for production of castings for machine-building purposes. *Mashinobudovannya: Zbirnik naukovikh prats*. 2013;(12):71–76. (In Russ.).
30. Ponomarev V.S., Kashevarova G.G. Analysis of rheological models of process of self-forming of glued wooden. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020;16(2):94–100. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-2-94-100>
31. Лузгин В.И., Коптяков А.С., Фризен В.Э., Петров А.Ю., Фаткуллин С.М. Инновационные технологии индукционной плавки сплавов в литейном производстве. *Литейщик России*. 2018;(4):29–33.
Luzgin V.I., Koptiyakov A.S., Frizen V.E., Petrov A.Y., Fatkul-lin S.M. Innovative technologies for induction melting of alloys in foundry. *Liteishchik Rossii*. 2018;(4):29–33. (In Russ.).
32. Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф. Дистанционный контроль в системе управления качеством заливки металла. *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2013;(3):450–459.
Maslov V.I., Arustamyanyan A.I., Minakov V.F. Remote control in quality management system of metal casting. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2013;(3): 450–459. (In Russ.).
33. Дорошенко В.С. Концепция литейного роторно-конвейерного комплекса с возможностью регулируемого охлаждения отливок, включая их термообработку. *Литейное производство*. 2019;(8):15–22.
Doroshenko V.S. The concept of a casting rotor-conveyor complex with the possibility of controlled cooling of castings, including their heat treatment. *Liteinoe proizvodstvo*. 2019;(8):15–22. (In Russ.).
34. Altena H., Schrank F. Modern gas-carburizing technology for the automotive industry. *Heat Treating Progress*. 2007; March/April: 17–22.
35. Gamberg A.E., Ershova I.V., Cherepanova E.V. The introduction of a mixed system of maintenance and repair of metal-cutting equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:033045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033045>
36. Pribulova A., Gengel P. Recycling of foundry dust in foundry process. In: *9th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference SGEM 2009: Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection*. 2009:689–696.
37. Князев С.В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством. В кн.: *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 г.* Новокузнецк: ИЦ СибГИУ; 2021:224–227.
Knyazev S.V. Algorithm for diagnosing the defects of castings and structure of their quality management system. In: *Modeling and High-Tech Information Technologies in Technical and Socio-Economic Systems. Proceedings of the V Int. Sci. and Pract. Conf., Novokuznetsk, April 14, 2021*. Novokuznetsk: SibSIU. 2021;224–227. (In Russ.).
38. Князев С.В., Усольцев А.А., Скопич Д.В. Программно-аппаратное обеспечение комплексной автоматизированной системы неразрушающего контроля дефектности отливок. В кн.: *Инновационные технологии в литейном производстве. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 22–23 апреля 2019 г.* / Под общ. ред. К.А. Батышева, К.Г. Семенова. Москва: Московский государственный областной университет; 2019:340–345.
Knyazev S.V., Usol'tsev A.A., Skopich D.V. Software and hardware for a complex automated system of non-destructive testing of castings defects. In: *Innovative Technologies in Foundry Production: Proceedings of the Int. Sci. and Tech. Conf. dedicated to the 150th Anniversary of the Faculty "Mechanical Engineering Technologies" and the Department "Materials Processing Technologies" of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, April 22–23, 2019*. Batsyhev K.A., Semenov K.G. eds. Moscow: Moscow State Regional University, 2019:340–345. (In Russ.).
39. Lubyany D.A., Mamedov R.O., Sokolov B.M., Sokolov B.M., Oznobikhina N.V. Resource and energy saving technology for producing high-quality steel castings with heat-time treatment. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012044>
40. Ukolov V.F., Chariyarova G.D., Castello P.D., Gomado E.D. Digital control as a function digital management and element adaptive transformation company. *Вестник Московской международной высшей школы бизнеса МИРБИС*. 2020; 3(23):29–33. <https://doi.org/10.25634/MIRBIS.2020.3.3>
Ukolov V.F., Chariyarova G.D., Castello P.D., Gomado E.D. Digital control as a function digital management and element adaptive transformation company. *Vestnik Moskovskoi mezh-dunarodnoi vysshei shkoly biznesa MIRBIS*. 2020;3(23): 29–33. <https://doi.org/10.25634/MIRBIS.2020.3.3>
41. Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Михно А.Р. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021;77(10):1076–1080. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1081>
Knyazev S.V., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Mikhno A.R. Algorithms for controlling the preparation of molding mixtures. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(10):1076–1080. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1081>
42. Князев С.В., Усольцев А.А., Куценко А.И., Куценко А.А., Пономарева К.В., Соколов Б.М., Ознобихина Н.В. и др. Использование современных технологий 3D-моделирования для повышения эффективности литья по выплавляемым моделям. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной научно-практической конференции*. 2017:205–208.
Knyazev S.V., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.I., Kutsenko A.A., Ponomareva K.V., Sokolov B.M., Oznobikhina N.V., etc. The use of modern 3D modeling technologies to improve castings efficiency. In: *Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality: Proceedings of the XX Int. Sci. and Pract. Conf*. 2017: 205–208. (In Russ.).
43. Oswald G., Kleinemeier M. *Shaping the Digital Enterprise: Trends and Use Cases in Digital Innovation and Transformation*. Springer International Publishing Switzerland; 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40967-2>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Сергей Валентинович Князев, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: krookia@mail.ru

Андрей Иванович Куценко, к.т.н., начальник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: aik_mail@mail.ru

Александр Александрович Усольцев, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: a.us@rambler.ru

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, заместитель директора научного центра качественных сталей, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Андрей Андреевич Куценко, к.т.н., доцент кафедры теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: aak_mail@mail.ru

Sergei V. Knyazev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: krookia@mail.ru

Andrei I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

E-mail: aik_mail@mail.ru

Aleksandr A. Usol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: a.us@rambler.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Director of the Scientific Center for High-Quality Steels, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: n.kozyrev@chermet.net

Andrei A. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Heat-Gas-Water-Supply, Water Disposal and Ventilation, Siberian State Industrial University

E-mail: aak_mail@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. В. Князев – написание основного текста статьи.

А. И. Куценко – формирование раздела «Цифровые инструменты литейного производства».

А. А. Усольцев – формирование раздела «Задачи цифровой трансформации литейного производства».

Н. А. Козырев – анализ и подбор литературных источников.

А. А. Куценко – анализ и подбор литературных источников.

S. V. Knyazev – writing the main text of the article.

A. I. Kutsenko – formation of the section “Digital tools of foundry production”.

A. A. Usol'tsev – formation of the section “Tasks of digital transformation of foundry production”.

N. A. Kozyrev – analysis and selection of literary sources.

A. A. Kutsenko – analysis and selection of literary sources.

Поступила в редакцию 21.01.2022

После доработки 01.09.2022

Принята к публикации 16.12.2022

Received 21.01.2022

Revised 01.09.2022

Accepted 16.12.2022