

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛИТЬЯ
ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ
В ПОЗАКАЗНОМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**

В.А. Долгов

П.А. Никишечкин

Н.В. Долгов

v.dolgov@stankin.ru

p.nikishechkin@stankin.ru

n.dolgov@stankin.ru

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена классификация восковых моделей по признаку применения для их изготовления типовой и специальной технологической оснастки — пресс-форм. Сформированы уникальные и универсальные группы восковых моделей. Метод литья по выплавляемым моделям, изготавливаемым комбинированным методом, включающим в себя получение универсальных восковых моделей в типовых пресс-формах, а уникальных — методом аддитивных технологий, имеет значительный потенциал применения в позаказном многономенклатурном производстве. Выявлены временные связи технологических циклов литья по выплавляемым моделям, получаемым традиционно в пресс-формах и комбинированным методом. Приведены расчеты технологических циклов изготовления отливок традиционным и комбинированным методами литья по выплавляемым моделям. Отмечена неоднозначность выбора метода изготовления отливок различных партий, обусловленная соотношением длительностей технологической подготовки производства уникальных восковых моделей, в пресс-формах и печати на принтере. Показано, что для изготовления партии отливок 1100 шт. рационально изготавливать восковые модели комбинированным методом, однако для партии отливок 1200 шт. универсальные и уникальные восковые модели рационально получать традиционным методом в пресс-формах. Для рассматриваемых партий отливок приведены циклограммы. Описаны основ-

Ключевые слова

Точное литье, аддитивные технологии, восковые модели, организация производства, многономенклатурное производство

ные критерии выбора метода изготовления восковых моделей в позаказном многономенклатурном производстве	Поступила 22.12.2022 Принята 10.04.2023 © Автор(ы), 2023
--	--

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 22-79-10254). Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инженеринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Минобрнауки России (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013)

Введение. Современное производство требует быстрой смены номенклатуры изделий, что влечет необходимость сокращения затрат и сроков технологической подготовки производства (ТПП).

Особенность литейного производства заключается в необходимости применения специальной технологической оснастки, проектирование и создание которой существенно увеличивает длительность цикла ТПП [1]. Наиболее трудоемкими являются процессы проектирования и создания пресс-форм для точных методов литья, широко применяемых в серийном и массовом типах производства точных отливок небольших размеров.

Высокая трудоемкость ТПП таких методов литья не позволяет оперативно переналаживать производство на выпуск изделий новой номенклатуры, что ограничивает область их рационального применения.

Современный рынок характеризуется многономенклатурным мелкосерийным типом производства. Предприятия, использующие точные методы литья, не могут эффективно выполнять единичные и мелкосерийные заказы.

Для расширения возможностей использования точных методов литья перспективным направлением является применение аддитивных технологий для изготовления оснастки [2]. Совместное использование традиционных методов литья и аддитивных технологий имеет высокий потенциал для эффективного применения точных методов литья в единичном и мелкосерийном типах производства [3–5].

Особенности технологического процесса изготовления восковых моделей. Ограничением широкого применения аддитивных технологий в методах точного литья является низкая производительность получения моделей аддитивными технологиями по сравнению с традиционными методами, например в пресс-формах.

Рассмотрим особенности ТПП и технологического процесса изготовления отливок при совместном применении аддитивных технологий и тра-

диционных методов литья на примере литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

В результате анализа восковых моделей, являющихся элементами модельного блока, по признаку их унификации выделены универсальные модели, составляющие литниково-питающую систему для изготовления различных отливок, и уникальные модели, применяемые непосредственно для получения конкретной отливки (рис. 1).

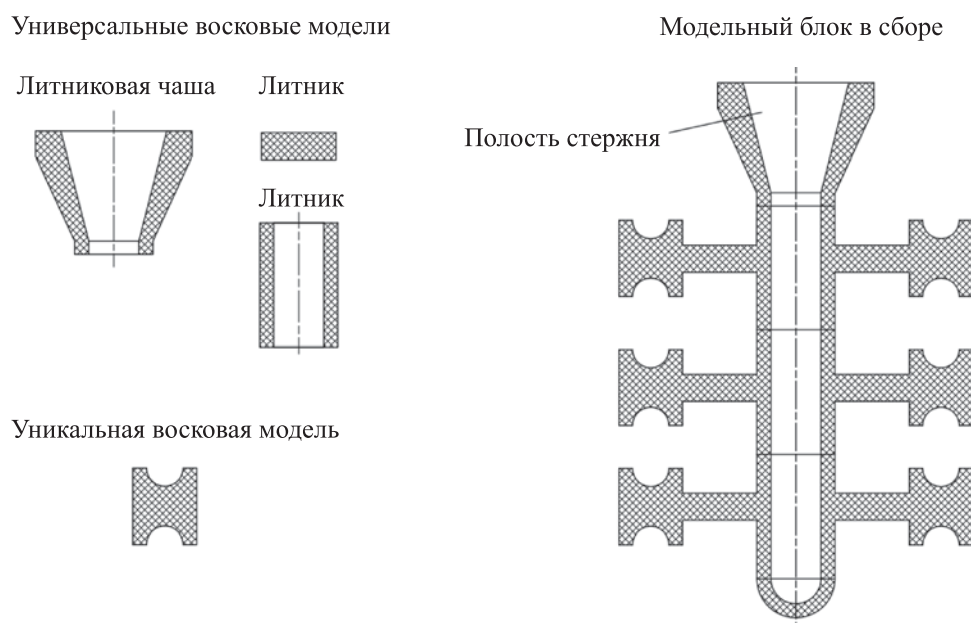


Рис. 1. Уникальные и универсальные модели (элементы модельного блока)

Универсальные восковые модели используются в качестве литниково-питающей системы. Одна и та же конфигурация универсальных восковых моделей может использоваться для производства модельных блоков, предназначенных для отливок различных номенклатур. Универсальные восковые модели изготавливаются с применением типовой технологической оснастки [6, 7].

Уникальные восковые модели применяются для изготовления конкретной отливки. Для производства уникальных восковых моделей по традиционной технологии требуются специальная технологическая оснастка, а также аддитивные технологии.

Учитывая, что производительность аддитивных технологий изготовления восковых элементов многократно уступает производительности их изготовления с использованием пресс-форм, применение аддитивных технологий целесообразно для производства уникальных восковых моделей.

Таким образом, в позаказном многономенклатурном производстве целесообразно рассматривать комбинированный метод получения моделей для модельного блока, включающий в себя аддитивные технологии и изготовление в типовых пресс-формах. При такой организации процесса аддитивные технологии внедряются уже в существующем литейном производстве для изготовления уникальных моделей, т. е. можно говорить о комбинированном методе ЛВМ (ЛВМ(К)) [6–9].

Состав и последовательность выполнения ТПП и технологических переделов литья в пресс-формах (ПФ) по ЛВМ (ЛВМ(ПФ)) и ЛВМ(К) приведены на рис. 2.

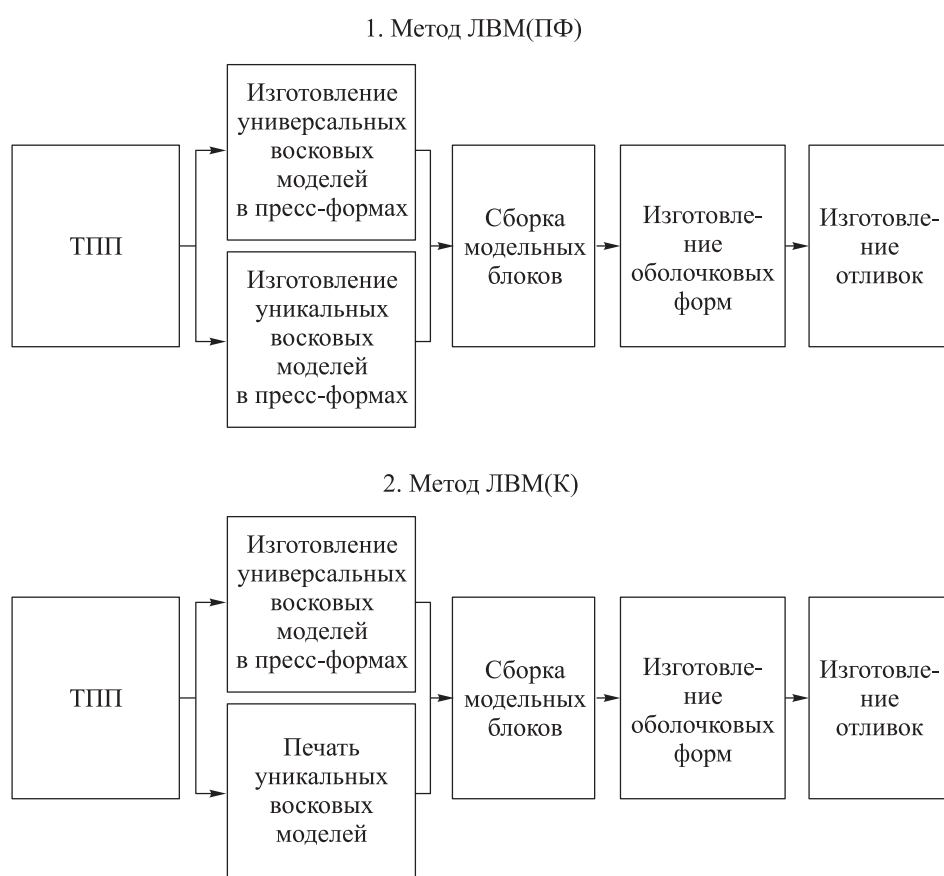


Рис. 2. Общая последовательность этапов ТПП и изготовления отливки

Состав основных технологических переделов ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К) отличается только на этапах ТПП и при создании уникальных восковых моделей.

Альтернативные технологические процессы изготовления уникальных восковых моделей для ЛВМ приведены на рис. 3.

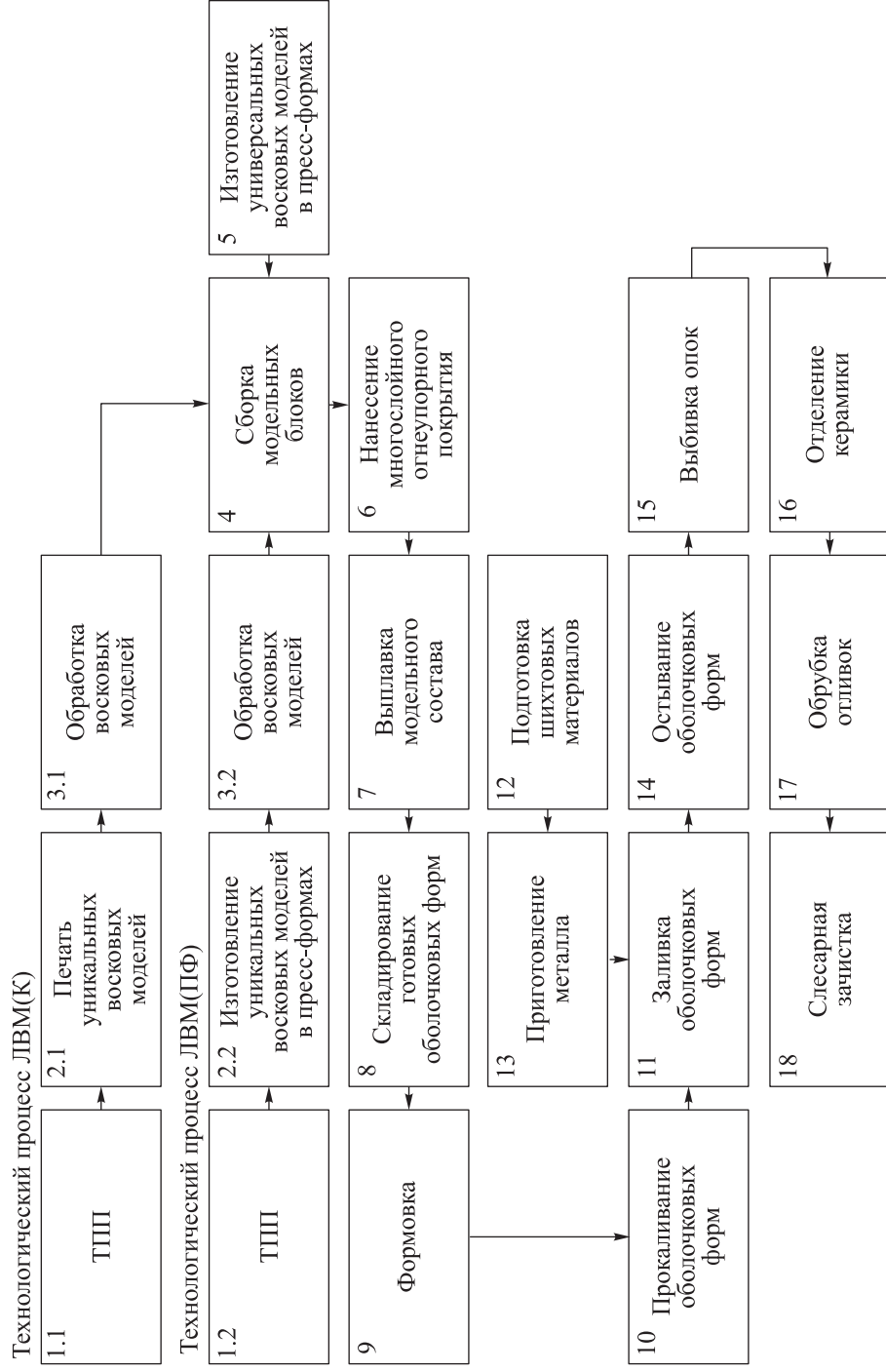


Рис. 3. Схема типовых технологических процессов ЛВМ

Этапы 1.1, 2.1, 3.1 (см. рис. 3) соответствуют технологическому процессу ЛВМ(К), этапы 1.2, 2.2, 3.2 — технологическому процессу ЛВМ(ПФ), этапы 1.1 и 1.2 относятся к ТПП. На этапе 5 изготавливаются универсальные восковые модели для ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К), что требует наличия аттестованной технологической оснастки. При дальнейших расчетах принималось, что процесс создания универсальных восковых моделей отлажен и предприятие имеет всю необходимую оснастку [1, 10–14]. Начиная с этапа 4 технологический процесс методов ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К) является общим.

В соответствии с приведенными типовыми технологическими процессами ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К) формируется состав технологического оборудования.

Предприятиям, использующим метод ЛВМ(ПФ), для реализации метода ЛВМ(К) дополнительно требуется оборудование для печати воском, которое будет применяться для изготовления уникальных восковых моделей вместо пресс-форм [9].

Ограничением развития аддитивных технологий для получения литейных форм является недостаточно развитая методическая база для сравнительного анализа циклов ТПП и технологических циклов изготовления литейных форм с использованием пресс-форм и аддитивных технологий для выбора рационального метода с учетом числа отливок одной номенклатурной позиции и сроков их изготовления [3, 15–20].

Выбор метода изготовления отливок. Приведем факторы, влияющие на выбор метода изготовления заданного числа отливок одной номенклатурной позиции:

- длительность ТПП;
- длительность изготовления уникальных восковых элементов ($T_{ц(УВЭ)}$);
- длительность изготовления заданной N -й программы отливок ($T_{ц(N)}$);
- проектирование и производство технологической оснастки ($T_{ц(ТехнОсн)}$), необходимой для изготовления уникальных восковых моделей для ЛВМ(ПФ);
- создание управляющей программы (УП) для аддитивного оборудования для ЛВМ(К) ($T_{ц(УП)}$).

При этом разработка технологической документации ($T_{ц(ТД)}$) имеет одинаковую длительность для рассматриваемых методов.

Выбор варианта технологического процесса изготовления восковых моделей. В качестве примера с учетом приведенных ограничений

рассчитаны длительности изготовления отливки типа «упор» массой 63 г (партии 1100 и 1200 шт.) из стали 45Л.

Расчет технологических циклов изготовления отливок методами ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К) проводился при следующих допущениях:

- процесс изготовления универсальных восковых моделей выполнялся с использованием существующей оснастки параллельно с изготовлением уникальных восковых моделей по аддитивным технологиям;
- в позаказном производстве сборка модельного блока начиналась после полной комплектации восковыми элементами с учетом производственной программы;
- процесс изготовления отливок в многономенклатурном мелкосерийном производстве начинался после изготовления оболочковых форм, необходимых для производства заданного числа отливок одной номенклатурной позиции. Значения основных показателей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета технологических циклов изготовления отливок для партий отливок 1100 и 1200 шт. методами ЛВМ(ПФ) и ЛВМ(К)

Метод (число отливок)	Тц(ТехОсн), ч	Тц(УП), ч	Тц(УВЭ), ч	Тц(N), ч
ЛВМ(ПФ) (1100 шт.)	120	–	13,75	1005,5
ЛВМ(К) (1100 шт.)	–	15	73,5	960,5
ЛВМ(ПФ) (1200 шт.)	120	–	15	998,25
ЛВМ(К) (1200 шт.)	–	15	367,5	519,5

Длительность разработки технологической документации $T_{ц}(ТД) = 40$ ч. Полученные циклограммы для партии отливок 1100 и 1200 шт. приведены на рис. 4.

Для анализа временных связей технологических циклов изготовления партий отливок показаны разности длительностей циклов ТПП (ΔT_1) и длительностей выполнения заказов (ΔT_2). Результаты расчета циклов и сравнительного анализа приведены в табл. 2.

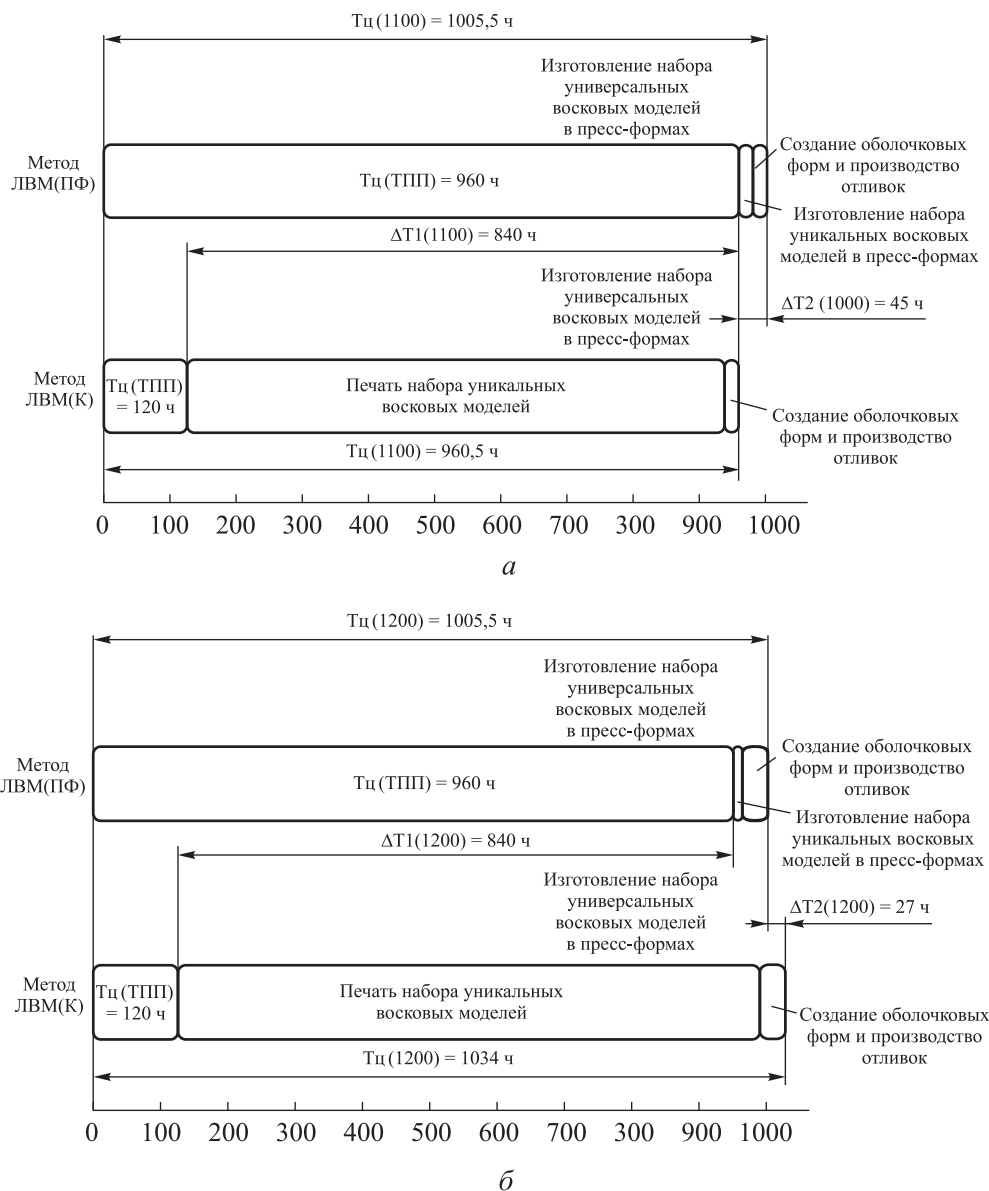


Рис. 4. Циклограммы методов литья, построенные с учетом критического пути изготовления партии отливок 1100 (а) и 1200 шт. (б)

Таблица 2

Результаты расчета циклов и сравнительного анализа

Метод (число отливок)	$T_{ц}(ТПП)$, ч	$\Delta T1$, ч	$T_{ц}(N)$, ч	$\Delta T2$, ч
ЛВМ(ПФ) (1100 шт.)	960	840	1005,5	45

Метод (число отливок)	$T_{ц}(ТПП)$, ч	ΔT_1 , ч	$T_{ц}(N)$, ч	ΔT_2 , ч
ЛВМ(К) (1100 шт.)	120	840	960,5	45
ЛВМ(ПФ) (1200 шт.)	960	840	1007	27
ЛВМ(К) (1200 шт.)	120		1034	

В результате анализа технологических циклов изготовления двух заказов установлено, что:

- разность числа отливок в партиях составляет 100 шт. (не более 8,5 %);
- длительности циклов ТПП не зависят от размера партии, $\Delta T_1(1100) = \Delta T_1(1200)$;

- разность циклов ТПП двух методов литья составляет $\Delta T_1 = 840$ ч, или 87 %;

- разность циклов выполнения заказов при использовании рассмотренных методов сильно зависит от выбора метода изготовления уникальных восковых моделей.

Проведенный расчет технологических циклов производства отливок с использованием комбинированного метода изготовления восковых моделей и изготовления в пресс-формах показал, что изготовить 1100 шт. отливок быстрее методом ЛВМ(К), а 1200 шт. — методом ЛВМ(ПФ).

Заключение. Показано, что целесообразность применения методов ЛВМ(К) и ЛВМ(ПФ) определяется размером партии отливок, циклами ТПП, долей уникальных восковых моделей в общем объеме. Таким образом, в рассмотренном примере для производства партии отливок менее 1100 шт. целесообразно изготавливать восковые модели комбинированным методом, а для партии более 1200 шт. — в пресс-формах.

При незначительной разности числа отливок в рассмотренных заказах имеется существенная разность длительности их выполнения, поэтому разработка методики и инструментария выбора рационального метода изготовления уникальных восковых моделей в многономенклатурном производстве является актуальной задачей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Особенности проектирования прессформ в литье по выплавляемым моделям. *Литье и металлургия*, 2007, № 1 (41), с. 93–95.
- [2] Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., et al. 3D-printing technique applied to rapid casting. *Rapid Prototyp J.*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 148–155.
DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540710750898>
- [3] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 43–58. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>
- [4] Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М., НАМИ, 2015.
- [5] Спрукуль В.О. Внедрение аддитивных технологий. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, № 3, с. 304–306.
- [6] Краузе Г. Аддитивное производство — будущее литейных технологий. *Литейное производство*, 2019, № 4, с. 27–29.
- [7] Митраков Г.Н., Сазонов В.С., Полякова А.В. и др. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий. *Омский научный вестник*, 2015, № 2 (140), с. 85–87.
- [8] Lipson H., Kurman M. *Fabricated. The new world of 3D-printing*. New York, John Wiley & Sons, 2013.
- [9] Hopkinson N., Hague R.J., Dickens P.M. *Rapid manufacturing*. New York, John Wiley & Sons, 2006.
- [10] Grigoriev S.N., Nikishechkin P.A., Dolgov V.A., et al. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 971, no. 3, art. 032094. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032094>
- [11] Шишковский И.В. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм. *Литейное производство*, 2010, № 6, с. 23–29.
- [12] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Подкидышев А.А. и др. Управление загрузкой рабочих мест при изменении номенклатуры и программы выпуска деталей в дискретном производстве. *Вестник машиностроения*, 2022, № 7, с. 85–88.
- [13] Nikishechkin P.A., Chervonnova N.Y., Nikich A.N. An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 709, no. 4, art. 044065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044065>
- [14] Григорьев С.Н., Телешевский В.И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования. *Измерительная техника*, 2011, № 7, с. 3–7.

[15] Yan Y., Li S., Zhang R., et al. Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Sc. Technol.*, 2009, vol. 14, no. S1, pp. 1–12. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70059-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8)

[16] Dolgov V.A., Arkhangel'skii V.E., Nikishechkin P.A. Method of analysis of production and logistics systems of discrete production based on product-process-resource model, external module for manufacturing control logic and simulation of work execution. *FarEastCon*, 2020, art. 9271250.

DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271250>

[17] Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2016, № 8, с. 210–217.

[18] Свиридов Д.А., Левин Д.Ю., Рябинина О.А. Проблемы использования 3D-печати методом FDM в технологическом процессе литья по выплавляемым моделям. *Вестник науки и образования*, 2020, № 17-2, с. 37–40.

[19] Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Черненко В.Е. и др. Система имитационного моделирования PlantTwin как инструмент верификации производственных планов и поддержки принятия решений для повышения эффективности машиностроительных производств. *Вестник машиностроения*, 2021, № 3, с. 80–85.

[20] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 3 (142), с. 84–99. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>

Долгов Виталий Анатольевич — д-р техн. наук, главный научный сотрудник кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1).

Никишечкин Петр Анатольевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1).

Долгов Никита Витальевич — младший научный сотрудник кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Долгов В.А., Никишечкин П.А., Долгов Н.В. Обоснование применения метода литья по выплавляемым моделям в позаказном многономенклатурном производстве. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2 (145), с. 47–60. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-47-60>

**JUSTIFICATION OF THE APPLICATION
OF THE LOST-WAX CASTING METHOD IN ORDER-BASED
MULTI-NOMENCLATURE PRODUCTION**

V.A. Dolgov

P.A. Nikishechkin

N.V. Dolgov

v.dolgov@stankin.ru

p.nikishechkin@stankin.ru

n.dolgov@stankin.ru

MSUT “STANKIN”, Moscow, Russian Federation

Abstract

It proposes classification of the manufactured wax models based on using standard and special technological equipment, i.e., the molds. Two groups of wax models were formed: unique and universal. The lost-wax casting method of models produced by a combined method that included production of the universal wax models in standard molds and unique ones — by the method of additive technologies appeared to obtain significant application potential in the demonstrative multi-nomenclature production. Time relationships in the technological cycles of lost-wax casting obtained by the traditional method in molds and the combined method are revealed. Calculations of technological cycles for manufacturing the lost-wax castings by traditional and combined methods are provided. Ambiguity in selection of the manufacturing method for different batches of castings is shown due to the ratio of the technological preparation duration in production of the unique wax models, manufacture in the molds and printing. It is demonstrated that to produce a batch of 1100 castings, it is rational to obtain wax models using the combined method; however, for a batch of 1200 castings, it is rational to obtain universal and unique wax models using the traditional method in the molds. Cyclograms are provided for the casting batches under consideration. Main criteria for selecting a method for obtaining wax models in the demonstrative multi-nomenclature production are described

Keywords

Precision casting, additive technologies, wax models, production organization, multi-nomenclature production

Received 22.12.2022

Accepted 10.04.2023

© Author(s), 2023

*The study was supported by RSF (project no. 22-79-10254).
The study was carried out on the equipment of the Centre of collective use “State Engineering Center” of MSUT “STANKIN” supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation (project no. 075-15-2021-695 from 26.07.2021, unique identifier RF-2296.61321X0013)*

REFERENCES

- [1] Sapchenko I.G., Zhilin C.G., Komarov O.H. Peculiarities of projecting of moulds in casting by melted model. *Litye i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2007, no. 1 (41), pp. 93–95 (in Russ.).
- [2] Bassoli E., Gatto A., Iuliano L., et al. 3D-printing technique applied to rapid casting. *Rapid Prototyp J.*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 148–155.
DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540710750898>
- [3] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., et al. Development of a structural model of a digital twin of machine-building enterprises production and logistics system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 43–58 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>
- [4] Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in machine building]. Moscow, NAMI Publ., 2015.
- [5] Sprukul V.O. Implementation of additive technologies. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics], 2017, no. 3, pp. 304–306 (in Russ.).
- [6] Krauze G. Additive manufacturing — the future of foundry technologies. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2019, no. 4, pp. 27–29 (in Russ.).
- [7] Mitrakov G.N., Sazonov V.S., Polyakova A.V., et al. Improving the efficiency of investment casting using additive technologies. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 2 (140), pp. 85–87 (in Russ.).
- [8] Lipson H., Kurman M. Fabricated. The new world of 3D-printing. New York, John Wiley & Sons, 2013.
- [9] Hopkinson N., Hague R.J., Dickens P.M. Rapid manufacturing. New York, John Wiley & Sons, 2006.
- [10] Grigoriev S.N., Nikishechkin P.A., Dolgov V.A., et al. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 971, no. 3, art. 032094. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032094>
- [11] Shishkovskiy I.V. Outlooks for rapid prototyping to make patterns and foundry molds. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2010, no. 6, pp. 23–29 (in Russ.).
- [12] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Podkidyshev A.A., et al. Managing the workplaces capacity when changing the nomenclature and manufacturing program of parts in discrete production. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022, no. 7, pp. 85–88 (in Russ.).
- [13] Nikishechkin P.A., Chervonnova N.Y., Nikich A.N. An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2020, vol. 709, no. 4, art. 044065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044065>

- [14] Grigoryev S.N., Teleshevskiy V.I. Measurement problems in technological shaping processes. *Meas. Tech.*, 2011, vol. 54, no. 7, pp. 744–749. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9798-5>
- [15] Yan Y., Li S., Zhang R., et al. Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Sc. Technol.*, 2009, vol. 14, no. S1, pp. 1–12. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70059-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8)
- [16] Dolgov V.A., Arkhangelskii V.E., Nikishechkin P.A. Method of analysis of production and logistics systems of discrete production based on product-process-resource model, external module for manufacturing control logic and simulation of work execution. *FarEastCon*, 2020, art. 9271250. DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271250>
- [17] Chemodurov A.N. The use of additive technologies in the production of engineering products. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2016, no. 8, pp. 210–217 (in Russ.).
- [18] Sviridov D.A., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Problems of using 3D-printing by FDM method in the technological process of casting on smelted models. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2020, no. 17-2, pp. 37–40 (in Russ.).
- [19] Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E., et al. PlantTwin simulation system as a tool for verifying production plans and supporting the decision-making to improve production effectiveness. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 3, pp. 80–85 (in Russ.).
- [20] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., et al. Simulation modeling production processes of various types of machine-building enterprises. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (142), pp. 84–99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>

Dolgov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Chief Research Fellow, Department of High-Efficient Processing Technology, MSUT “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation).

Nikishechkin P.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Department of High-Efficient Processing Technology, MSUT “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation).

Dolgov N.V. — Junior Research Fellow, Department of High-Efficient Processing Technology, MSUT “STANKIN” (Vadkovskiy pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Dolgov N.V. Justification of the application of the lost-wax casting method in order-based multi-nomenclature production. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 47–60 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-47-60>