#### **ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО / FOUNDRY**

УДК 621.74.045 https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-41-57 Hаучная статья Research article



# Влияние покрытий для карбамидных моделей на качество оболочковых форм, полученных с применением водных связующих

В.Е. Баженов<sup>1</sup>, Е.П. Ковышкина<sup>1</sup>, А.А. Никитина<sup>1</sup>, Ю.В. Целовальник<sup>1</sup>, А.А. Белова<sup>1</sup>, А.В. Колтыгин<sup>1</sup>, В.Д. Белов<sup>1</sup>, Б.Е. Хвацков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

#### <sup>2</sup> ПАО «ОДК-Кузнецов»

Россия, 443009, г. Самара, Заводское шоссе, 29

Вячеслав Евгеньевич Баженов (V.E.Bagenov@gmail.com)

Аннотация: При изготовлении отливок методом литья по выплавляемым моделям наряду с восковыми выплавляемыми используют и водорастворимые солевые модели на основе карбамида. Известно, что карбамидные модельные массы обеспечивают высокую прочность и позволяют сохранять форму моделей даже в случае повышения температуры в цехе. Тем не менее в силу экологических и производственных причин в настоящее время актуальным является переход на технологический процесс с применением готовых водных связующих на основе силиказоля. При этом возникают проблемы, связанные с изготовлением керамической оболочковой формы, из-за взаимодействия модельной массы и суспензии на водном связующем. В работе рассмотрена эффективность защитных покрытий на основе ремонтного воска, лака (АК 593) и лака с канифолью, нанесенных на водорастворимые модели на основе карбамида с добавками сульфата магния, нитрата калия, поливинилового спирта и диметилглиоксима. Степень взаимодействия оценивали по краевому углу смачивания и площади растекания водного связующего по поверхности образцов модельных масс с различными покрытиями. Было установлено, что все покрытия обеспечивают увеличение краевого угла смачивания и уменьшение площади растекания. Также с использованием ряда модельных составов с защитными покрытиями были получены керамические формы и отливки из никелевого жаропрочного сплава, для которых оценивали шероховатость и размерную точность. Было показано, что в случае нанесения покрытия на основе ремонтного воска защитные свойства недостаточны, что приводит к появлению трещин и наплывов в форме. В отливке это выражается в образовании механического пригара и значительном снижении размерной точности. В случае применения покрытий на основе лака и лака с канифолью каких-либо дефектов в форме или отливке не наблюдается, и именно эти покрытия можно рекомендовать в качестве защитных при использовании модельных составов на основе карбамида и суспензий на основе водных связующих.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, карбамидные модельные массы, растворимые солевые модели, водные связующие, защитные покрытия, краевой угол смачивания.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г. по соглашению о предоставлении субсидии № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г. «Создание технологии изготовления уникальных крупногабаритных отливок из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей, ориентированной на использование отечественного оборудования и организацию современного ресурсоэффективного, компьютероориентированного литейного производства».

Для цитирования: Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Никитина А.А., Целовальник Ю.В., Белова А.А., Колтыгин А.В., Белов В.Д., Хвацков Б.Е. Влияние покрытий для карбамидных моделей на качество оболочковых форм, полученных с применением водных связующих. Известия вузов. Цветная металлургия. 2025;31(1):41–57. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-41-57

# Influence of coatings for urea-based patterns on the quality of shell molds produced using colloidal silica binders

# V.E. Bazhenov<sup>1</sup>, E.P. Kovyshkina<sup>1</sup>, A.A. Nikitina<sup>1</sup>, Yu.V. Tselovalnik<sup>1</sup>, A.A. Belova<sup>1</sup>, A.V. Koltygin<sup>1</sup>, V.D. Belov<sup>1</sup>, B.E. Hvatskov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology "MISIS"
<sup>1</sup> Bld, 4 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

#### <sup>2</sup> PJSC "UEC-Kuznetsov"

29 Zavodskoe Shosse, Samara 443009, Russia

☑ Viacheslav E. Bazhenov (V.E.Bagenov@gmail.com)

Abstract: In the investment casting process, in addition to wax patterns, water-soluble salt patterns made of urea are also used. It is known that urea-based patterns provide high strength and allow the patterns to maintain their shape even if the temperature in the foundry increases. However, due to environmental and production-related reasons, there is currently a growing demand for transitioning to a technological process involving colloidal silica binder. This transition presents challenges related to the manufacturing of ceramic shell molds due to the interaction between the pattern compound and the colloidal silica binder slurry. This study examines the effectiveness of protective coatings based on repair wax, varnish (AK 593), and varnish with rosin, applied to water-soluble urea-based patterns containing additives such as magnesium sulfate, potassium nitrate, polyvinyl alcohol, and dimethylglyoxime. The degree of interaction was assessed by measuring the wetting angle and the spreading area of the colloidal silica binder over the surface of pattern samples with various coatings. It was found that all coatings contributed to an increase in the wetting angle and a reduction in the spreading area. Additionally, ceramic molds and castings made of nickel superalloy were produced using a series of pattern compounds with protective coatings. The surface roughness and dimensional accuracy of the castings were evaluated. It was demonstrated that the protective properties of the repair wax-based coating were insufficient, leading to the formation of cracks and sagging in the mold. This resulted in penetration defects in the castings and a significant decrease in dimensional accuracy. In contrast, when using coatings based on varnish and varnish with rosin, no defects were observed in the mold or castings, making these coatings recommended as protective solutions for urea-based pattern compounds in contact with colloidal silica binder slurries.

Keywords: urea-based pattern compounds, water-soluble salt patterns, colloidal silica binders, protective coatings, wetting angle.

Acknowledgments: This research received financial support from the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2022-023 from 06 April 2022) under the program "Scientific and technological development of the Russian Federation" according to governmental decree No. 218 dated 09 April 2010.

For citation: Bazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Nikitina A.A., Tselovalnik Yu.V., Belova A.A., Koltygin A.V., Belov V.D., Hvatskov B.E. Influence of coatings for urea-based patterns on the quality of shell molds produced using colloidal silica binders. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(1):41–57. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-1-41-57

# Введение

Среди применяемых в настоящее время литейных технологий для изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок из никелевых жаропрочных сплавов в основном используется метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [1—2]. В его основе — получение в металлической пресс-форме выплавляемой модели будущей отливки, чаще всего из модельных масс на основе наполненных восков [3]. Модельные массы на основе наполненных восков имеют ряд недостатков, что заставляет авиационные предприятия по сей день использовать для изготовления моделей крупногабаритных корпусных отливок водорастворимые модели на основе карбамида (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) [4—9]. К преимуществам солевых водорастворимых моделей относятся их высокая прочность, твердость, низкая линейная усадка, малая зольность [10; 11]. Помимо низкой величины усадки, высокой точности получаемых отливок способствует отсутствие размягчения и ползучести модели при повышении температуры, характерных для восковых моделей [12]. Карбамид также находит свое применение при получении пеноматериалов методом ЛВМ [13—15]. Наряду с классическим способом получения солевых водорастворимых моделей в пресс-формах, для изготовления моделей могут использоваться аддитивные технологии [16].

В связи с тем, что солевые модели растворимы в воде, необходимо предотвратить растворение модели в ходе формирования огнеупорной оболочки [17]. Одним из способов решения проблемы растворения модели является применение не содержащих химически свободную воду суспензий, изготовленных, например, на основе гидролизованного раствора этилсиликата (ЭТС) типа орг-1 [18]. Однако существует ряд проблем, связанных с использованием ЭТС на производстве. Известно, что отверждение суспензии на основе ЭТС происходит в кислой среде, а карбамид имеет водородный показатель, близкий к нейтрально-щелочному [17]. Таким образом, при контакте модели и суспензии происходит снижение качества внутреннего слоя формы и его разупрочнение, что сказывается на качестве отливок [10]. В то же время применение в современном производстве суспензий на основе ЭТС неэкологично из-за использования для сушки слоев оболочковой формы паров аммиака, а технологический процесс изготовления форм, основанный на применении ЭТС, не поддается автоматизации [18].

В настоящее время суспензии на готовом водном связующем на основе силиказоля постепенно вытесняют суспензии на ЭТС. В отличие от последних они негорючи и отверждаются сушкой на воздухе, поэтому подходят для организации автоматизированного или роботизированного литейного производства. Однако для суспензий, приготовленных на водном связующем, проблема растворения и последующего взаимодействия с солевыми моделями стоит еще более остро, чем для суспензий на основе гидролизованного раствора этилсиликата [17].

Один из способов снижения интенсивности взаимодействия солевых моделей с оболочковой формой состоит в изменении состава солевой композиции, например путем добавления компонентов, которые будут уменьшать скорость растворения моделей. Основными добавками к карбамиду в составах солевых модельных масс являются сульфат магния, нитрат калия, поливиниловый спирт, этиленвинилацетат, воск [19; 20]. В работе [12] для снижения гигроскопичности предложено в модельную массу добавлять диметилглиоксим. Анализ краевого угла смачивания при нанесении водного связующего на модельные массы, содержащие добавки сульфата магния, поливинилового спирта, нитрата калия и диметилглиоксима, показал, что поливиниловый спирт и диметилглиоксим способствуют повышению краевого угла смачивания и снижению степени взаимодействия связующего с модельной массой [21].

Более предпочтительным способом предотвращения взаимодействия модельной массы с суспензией на водном связующем является защита солевых моделей с помощью нанесения на их поверхность водостойких защитных покрытий. Например, модели на основе карбамида можно кратковременно погружать в жидкий парафин или другую модельную массу на основе восков для образования гидрофобной пленки на их поверхности [10]. В работе [22] показано, что защитное покрытие, образованное раствором 3 мас. % ПС50-50 в 100 мл бензина Калоша БР-2, обеспечивает максимальный краевой угол смачивания и наименьшую площадь растекания суспензии по поверхности модели. Применение такого защитного покрытия позволило получить керамическую оболочку, обладающую низкой шероховатостью. В работе [23] в качестве защитных покрытий предлагается использовать битумные и перхлорвиниловые лаки со смесевыми растворителями. Применение этих лаков, в зависимости от степени разбавления, позволяет получать защитные пленки толщиной от 4 до 10 мкм, что не оказывает сильного влияния на размерную точность получаемых отливок.

Еще одним интересным способом снижения степени взаимодействия моделей на основе карбамида и водных связующих является применение смешанной технологии изготовления форм. Так, в работах [24; 25] предлагается на модель наносить сначала слой суспензии на гидролизованном растворе этилсиликата, а затем — слой суспензии на водном связующем. Данный способ позволяет частично защитить водорастворимую модель от взаимодействия с водным связующим, однако привносит дополнительные технологические операции. К тому же это не решает проблему, связанную с применением в производстве вредных компонентов.

Таким образом, существуют два основных способа ограничить взаимодействие модельного состава и суспензии: изменение состава модельной массы и нанесение гидрофобного покрытия на поверхность модели. Их совместное изучение представляет научный и практический интерес. В связи с этим целью работы было исследование взаимодействия различных модельных композиций после нанесения защитных покрытий с готовым водным связующим на основе силиказоля.

#### Материалы и методика исследования

В качестве материалов для исследования были выбраны 5 модельных составов на основе карбамида с добавками сульфата магния, поливинилового спирта, нитрата калия и диметилглиоксима (табл. 1), основные свойства которых были исследованы ранее в работе [21]. Было показано, что добавки поливинилового спирта и диметилглиоксима способствуют увеличению краевого угла смачивания между водным связующим и модельным составом [21].

С использованием формы из алюминиевого сплава были получены растворимые модели, состоящие из стояка с расположенными на нем параллелепипедами размерами 10 × 25 × 25 мм (рис. 1).

В качестве покрытий рассмотрены составы на основе ремонтного воска и лака AK 593 (см. табл. 2). Лак AK-593 представляет собой раствор смолы BMK-5 в смеси органических растворителей с добавлением пластификатора. Неизвестно, будет ли суспензия оставаться на поверхности модели после покрытия ее лаком AK 593, так как она может стекать с нее при очень высоком краевом угле смачивания. В связи с этим был рассмотрен еще один вариант покрытия, где дополнительно, для



Рис. 1. Схематичное изображение растворимой модели

Fig. 1. Schematic representation of the water-soluble pattern  $% \mathcal{F}(\mathcal{F})$ 

обеспечения лучшего смачивания поверхности, на лак наносился слой канифоли [26].

На растворимые модели, полученные с использованием каждого из 5 вариантов модельного со-

Маркировка состава	Компоненты модельной массы и их содержание, мас. %				
	Карбамид CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	Сульфат магния MgSO <sub>4</sub>	Поливиниловый спирт (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) <sub>x</sub>	Нитрат калия KNO <sub>3</sub>	Диметилглиоксим C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
#1	98	2	_	_	_
#2	96	2	2	_	_
#3	90	—	—	10	—
#4	88	_	2	10	_
#5	88	_	_	10	2

#### Таблица 1. Состав модельных масс

Table 1. Composition of pattern compounds

#### Таблица 2. Исследуемые защитные покрытия

Table 2. Investigated protective coatings

Тип покрытия	Состав защитного покрытия и последовательность его нанесения	
#B	3 г ремонтного воска (смесь церезина и петролатума) в 100 мл бензина Калоша (ГОСТ 443-76) в 2 слоя с помощью губки	
#Л	Лак АК 593 (ТУ 6-10-1053-75) в 1 слой окунанием	
#Л + К	Лак АК 593 в 1 слой окунанием + 5 г сосновой канифоли (ГОСТ 19113-84) в 100 мл этилового спирта (ГОСТ 5962-2013) в 2 слоя (нанесение с помощью губки)	

става, наносили 3 защитных покрытия. Состав покрытий и последовательность операций при их нанесении представлены в табл. 2. Применялись покрытия на основе воска (#В), лака АК 593 (#Л) и лака с канифолью (#Л + К).

Для оценки степени взаимодействия модельных составов с водным связующим и защитной способности покрытий определяли краевой угол смачивания и площадь растекания водного связующего по поверхности образцов экспериментальных модельных масс с нанесенными покрытиями. Чем ниже значение краевого угла смачивания и больше площадь растекания, тем интенсивнее протекает взаимодействие жидкости и подложки.

Для определения краевого угла смачивания методом лежащей капли и площади растекания на заготовку из модельной массы наносили три капли (0,08-0,09 мл) связующего «UltraCast One+» с помощью пластиковой пипетки. Далее производили видеосъемку капли сбоку с помощью видеокамеры SONY NEX EA50H в режиме макросъемки с макрообъективом «Sony E PZ 18-200 mm F3.5-6.3» и макрокольцами «Meike MK-S-AF3A». Затем из видеозаписи извлекались кадры, соответствующие моменту нанесения капли, а также, далее, каждой 10-й секунде в течение первой минуты. Начиная со второй минуты видеозаписи шаг извлечения кадров увеличивали до 1 мин. Последний кадр соответствовал 6-минутной выдержке капли. По окончании эксперимента осуществляли съемку капли сверху для определения площади растекания. Для каждого модельного состава и типа покрытия эксперимент по определению краевого угла смачивания и площади растекания проводили на 3 образцах. Краевой угол смачивания и площадь растекания определяли на полученных кадрах с помощью программы анализа изображений «ImageJ 1.52а» (National Institutes of Health, США).

Чтобы оценить качество отливок, получаемых с использованием экспериментальных модельных составов и покрытий, были изготовлены керамические формы, в которые заливали образцы из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ. Указанный сплав применяется в отечественном авиастроении для крупногабаритного корпусного литья, используемого в конструктивных элементах камер сгорания. По этой причине сплав часто заливают в керамические формы, при получении которых наполнителем служит плавленый кварц.

Модели, полученные из модельных составов #2 и #5 со всеми вариантами покрытий, применялись для изготовления керамических форм. Ранее были исследованы различные свойства ряда водных связующих, суспензий, а также керамических образцов, полученных с их использованием [27]. Описанная далее технология изготовления керамических форм и применяемые материалы выбраны на основе результатов работы [27].

Суспензию готовили путем смешивания 5 л связующего с 10 кг пылевидного плавленого кварца ПКП 0,045 мм (ООО «Кефрон», г. Екатеринбург). Для первого и второго слоев керамики использовали связующее «UltraCast One+», для последующих — «UltraCast Prime» (оба производства ООО «Технопарк», г. Москва). После замешивания суспензия выдерживалась в течение 24 ч для обеспечения смачивания микропорошка связующим и выхода воздуха. Перед использованием суспензию перемешивали. Затем определяли ее условную вязкость с помощью вискозиметра ВЗ-4. Если вязкость не соответствовала целевым значениям (60 с для суспензии 1-го и 2-го слоев и 40 с для 3-го и последующих слоев), в нее дополнительно добавляли связующее, производили повторное перемешивание и снова определяли вязкость, пока не достигались указанные выше значения. На модель окунанием наносили суспензию и осуществляли обсыпку плавленым кварцем ПК 0,25-0,4 мм (1-2 слои), ПК 0,4-0,6 мм (3-4 слои) и ПК 0,5-1,0 мм (5-7 слои) производства ООО «Кефрон». Финальный 8-й слой суспензии наносили без последующей обсыпки (облицовочный слой). Сушку 1-го слоя производили на воздухе ( $t = 21 \div 22$  °C, влажность 55— 72 %) в течение 2 ч, а каждого из последующих слоев — с обдувом воздухом ( $t = 21 \div 22$  °C, влажность 64—85 %, т = 2 ч). Модельный состав удаляли через 24 ч после нанесения финишного слоя путем его растворения в горячей воде ( $t = 95 \pm 5$  °C).

Готовые формы устанавливали в контейнер и снаружи засыпали опорным наполнителем крупным кварцевым песком. Далее осуществляли прокалку форм — в течение 2 ч нагревали их до температуры 900 °С с последующей выдержкой 4 ч. Перед заливкой контейнер с формами переносили на заливочный плац. В качестве шихты использовали готовый никелевый жаропрочный сплав ВЖЛ14Н-ВИ (ОСТ 1 90126-85, мас. %: Ni — основа; С — до 0,08; Сг — до 20,0; Мо — до 5,0; А1 — до 1,5; Ti — до 2,9; Nb — до 2,8; Fe — до 10), изготовленный ВИАМ (г. Москва). Плавку вели в индукционной печи (ООО НПП «РЭЛЕК», г. Екатеринбург) в периклазовом тигле (НТЦ «Бакор», г. Щербинка). Масса выплавляемого сплава составляла 8 кг. Плавку вели под покровом боя силикатного стекла. Разливку расплава в литейные формы проводили при температуре ~1500 °C.

Отличительной особенностью метода литья по выплавляемым моделям являются высокая размерная точность и низкая шероховатость получаемых отливок. В связи с этим для отливок, выполненных с использованием различных модельных составов и покрытий, определяли шероховатость и отклонения размеров, а также, на основании полученных размеров, усадку, так как ее необходимо учитывать при разработке технологии изготовления отливки.

Шероховатость поверхности литых образцов измеряли с помощью профилометра M300C («MarSurf», Германия). Среднее значение получали по результатам 7 измерений.

Для определения размеров литых образцов, а также их линейной усадки производили лазерное сканирование отлитых образцов посредством ручного 3D-сканера «KScan Magic» (ScanTech, Китай). Точность измерения прибора составляла ±20 мкм. Обработку результатов оцифровки выполняли с помощью программы «Geomagic Design X» (3D Systems, США). Измеряли ширину отливки ( $l_{\rm M}$ ) в 3 местах. Зная ширину полости в форме, используемой для получения модели ( $l_{\rm \phi} = 82$  мм), вычисляли суммарную линейную усадку модели, керамической формы и сплава с помощью выражения  $\varepsilon = [(l_{\rm \phi} - l_{\rm M})/l_{\rm \phi}] \cdot 100 \%$ .

Поскольку для высокотемпературных сплавов характерно взаимодействие с материалами форм, изучали структуру поверхностных слоев формы после заливки и отливки. Микроструктуру и фазовый состав поверхностного слоя отливок и форм исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Vega SBH3» (Tescan, Чехия) с приставкой энергодисперсионного микроанализа (Oxford, Великобритания) и оптического микроскопа (ОМ) «Axio Observer. D1m» (Carl Zeiss, Германия).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость краевого угла смачивания ( $\theta$ ) от времени выдержки ( $\tau$ ) капли водного связующего на поверхности образцов из исследуемых модельных составов с покрытиями и без. В случае отсутствия покрытия (рис. 2, *a*) краевой угол смачивания сразу после нанесения связующего составил 20—40°, а после 5-минутной выдержки —  $\theta = 2\div13^\circ$  [21]. Наличие в модельном составе добавки поливинилового спирта и диме-

тилглиоксима приводит к более высоким значениям θ.

На рис. 2, б представлены значения краевого угла смачивания для тех же модельных составов, но после нанесения защитного покрытия на основе воска. Начальные значения в сразу после нанесения капли связующего для образцов с покрытием #В составляют 35-43°, что достаточно близко к значениям, полученным для модельных масс без покрытия. В то же время можно видеть, что при дальнейшей выдержке капли на поверхности образца уменьшение краевого угла смачивания не столь значительно, в сравнении со случаем отсутствия покрытия. Аналогичные результаты были получены ранее в работе [22], и это свидетельствует о том, что интенсивность взаимодействия модельной массы и связующего снижается после нанесения покрытий на основе воска. Вероятнее всего, при нанесении покрытия #В и последующем высыхании растворителя покрытие не полностью покрывает поверхность образца и имеются очаги растворения модели. Следует отметить, что композиция модельного состава также оказывает влияние на краевой угол смачивания, и максимальные значения в наблюдаются для состава с добавкой диметилглиоксима. Эта добавка способствует снижению гигроскопичности модельной массы и, таким образом, обеспечивает повышение краевого угла смачивания. Что же касается остальных составов, то значения θ для них достаточно близки и после нанесения покрытия #В составляют 17-27°. То есть влияния добавки поливинилового спирта на увеличение краевого угла смачивания в данном случае не обнаружено.

На рис. 2, в приведены значения краевого угла смачивания после нанесения лака. Можно видеть, что его начальные значения сразу после нанесения покрытия составляют ~41° для составов #4 и #5, ~32° — для составов #1 и #2, ~23° — для состава #3. То есть минимальное значение краевого угла смачивания наблюдается для модельного состава, который содержит только нитрат калия. Составы, содержащие сульфат магния, имеют чуть большее значение  $\theta$ , причем поливиниловый спирт никак не влияет на величину θ. Максимальное значение краевого угла смачивания обеспечивается для составов с добавками нитрата калия, поливинилового спирта и диметилглиоксима. Влияние поливинилового спирта на показатель в обусловлено снижением гигроскопичности модельного состава. Ранее было установлено, что образцы из модельного состава #3 имеют максимальную шеBazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Nikitina A.A. et al. Influence of coatings for urea-based patterns on the quality of shell molds produced...



**Рис. 2.** Краевой угол смачивания (θ) водным связующим поверхности образцов модельных масс без покрытия (*a*) [21] и с покрытиями #В (б), #Л (*в*), #Л + К (*г*) (см. табл. 2) в зависимости от времени (т) для модельных составов #1–#5

#1 - 98 % карбамида + 2 % сульфата магния; #2 - 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта; #3 - 90 % карбамида + 10 % нитрата калия; #4 - 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % поливинилового спирта; #5 - 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

**Fig. 2.** Wetting angle with colloidal silica binder of the surface of pattern samples without coating (*a*) [21] and with coatings #Wax ( $\boldsymbol{\delta}$ ), #Varnish ( $\boldsymbol{s}$ ) and #Varnish + Rosin ( $\boldsymbol{z}$ ) (Table 2) as a function of time for pattern compounds #1-#5

#1-98 % urea + 2 % magnesium sulfate; #2-96 % urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol; #3-90 % urea + 10 % potassium nitrate; #4-88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % polyvinyl alcohol; #5-88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

роховатость [21]. По всей видимости, это связано с тем, что структура модельных составов после затвердевания может различаться и слой покрытия на их поверхности формируется неодинаково. В случае нанесения лакового покрытия краевой угол смачивания в ходе выдержки образцов мало меняется и уменьшается на 4—15° после 5-минутной выдержки. Небольшое снижение краевого угла смачивания со временем, а также влияние композиции модельного состава на его величину могут свидетельствовать как о нарушении целостности покрытия, так и о взаимодействии покрытия со связующим. Нанесение дополнительного слоя канифоли на лаковое покрытие (рис. 2, *г*) приводит к тому, что в начальный момент после нанесения связующего краевой угол смачивания вообще не зависит от вида композиции модельного состава и составляет ~35°. В ходе выдержки капли связующего на поверхности образца значения  $\theta$  меняются неодинаково, и проявляется близкая к полученной для лакового покрытия зависимость. Это может быть связано с тем, что в начальный момент, после нанесения капли связующего, краевой угол смачивания определяется именно взаимодействием связующего со слоем канифоли. В дальнейшем

происходит его нарушение, и взаимодействие связующего происходит с лаковым покрытием. В среднем, для всех составов, краевой угол смачивания составляет 17—23°.

Помимо краевого угла смачивания, для оценки защитных свойств покрытий можно использовать площадь растекания (*S*) связующего по поверхности образца из модельного состава. На рис. 3 представлена площадь растекания связующего на поверхности образцов из исследуемых модельных составов с различными вариантами покрытий по прошествии 2 ч (после полного высыхания связующего). Максимальная площадь растекания 170—180 мм<sup>2</sup> была получена для образцов модельных масс на основе карбамида с добавками поливинилового спирта (#2 и #4), покрытых защитным



Рис. 3. Площадь растекания водного связующего на поверхности образцов модельных масс с покрытиями #В, #Л и #Л + К (см. табл. 2) после выдержки 2 ч для модельных составов #1–#5

*#1*-98 % карбамида + 2 % сульфата магния;

#2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта;

#3 – 90 % карбамида + 10 % нитрата калия;

#4 — 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % поливинилового спирта;

#5 – 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

**Fig. 3.** Spreading area of the colloidal silica binder on the surface of pattern compound samples with coatings #W, #V and #V + R (see Table 2) after a 2-hour holding period for pattern compounds #1-#5

#1 - 98 % urea + 2 % magnesium sulfate;

#2-96% urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol;

#3 - 90 % urea + 10 % potassium nitrate;

#4-88~%urea + 10 % potassium nitrate + 2 % polyvinyl alcohol;

#5 - 88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

составом на основе ремонтного воска. Также высокое значение  $S = 140 \text{ мм}^2$  было получено для модельного состава с сульфатом магния (#1) с покрытием на основе воска. С учетом высоких значений доверительных интервалов можно сказать, что для всех модельных составов, покрытых только лаком и лаком с канифолью, площадь растекания связующего составляет 90-130 мм<sup>2</sup>. В целом полученные результаты S подтверждают выводы, сделанные в ходе анализа краевых углов смачивания, о том, что лаковые покрытия, в отличие от покрытия на основе воска, обеспечивают лучшие защитные свойства, причем значения краевого угла смачивания и площади растекания в большей степени определяются именно защитными свойствами самих покрытий, а не модельных составов. Также необходимо отметить, что если рассматривать влияние различных покрытий на площадь растекания связующего для различных модельных составов, то минимальные значения S (как и максимальные значения углов θ) наблюдаются для образцов с добавкой диметилглиоксима (состав #5). Как было указано ранее, эта добавка в значительной степени снижает гигроскопичность модельного состава.

Основываясь на результатах определения краевого угла смачивания и площади растекания связующих, для дальнейшего исследования были выбраны два модельных состава: #2 (96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта) и #5 (88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима). На рис. 4 представлены фотографии керамических форм, полученных с использованием модельных составов #2 и #5 и покрытий на основе ремонтного воска и лака, на разных этапах изготовления.

При нанесении первых двух слоев керамики на модель из состава #2 с покрытием на основе ремонтного воска были обнаружены небольшие наплывы (рис. 4, а). При изучении краевого угла смачивания и площади растекания связующего на модельном составе было обнаружено, что в случае явного взаимодействия связующего с модельным составом одновременно происходит растворение модельного состава связующим (образуется углубление в образце) и рост кристаллов связующего на границе раздела модель-связующее. При этом вырастают достаточно крупные кристаллы модельного состава, выходящие за исходные границы образца. По всей видимости, формирование наплывов связано с недостаточными защитными свойствами покрытия, что приводит к частичному растворению модельного состава и, одновремен-



**Рис. 4.** Фотографии керамических форм, полученных с использованием различных модельных масс и защитных покрытий

*а*,  $\delta$  — модельный состав #2 (96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта) с покрытием на основе ремонтного воска (#В) в 2 слоя (*a*) и 7 слоев ( $\delta$ ); *в*- $\delta$  — модельный состав #5 (88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима) с покрытием на основе ремонтного воска (#В) в 2 слоя (*в*, *г*) и лака (#Л) в 7 слоев ( $\delta$ )

**Fig. 4.** Photographs of ceramic molds produced using various pattern compounds and protective coatings

*a*,  $\delta$  – pattern compound #2 (96 % urea + 2 % magnesium sulfate + + 2 % polyvinyl alcohol) repair wax-based coating #W, 2 layers (*a*) and 7 layers ( $\delta$ );

 $\boldsymbol{e}-\boldsymbol{\partial}$  – pattern compound #5 (88 % urea + 10 % potassium nitrate + + 2 % dimethylglyoxime) with a repair wax-based coating #W, 2 layers ( $\boldsymbol{e}, \boldsymbol{z}$ ), and varnish-based coating #V, 7 layers ( $\boldsymbol{\partial}$ )

но, росту кристаллов модельного состава, которые и отодвигают слой керамики. Несмотря на это, все 7 слоев керамики были нанесены на модель. Внешний вид формы представлен на рис. 4, *б*.

В случае использования модельной массы, содержащей диметилглиоксим (#5), с покрытием на основе ремонтного воска (#В), при нанесении первых слоев керамики наблюдаются их растрескивание и разрушение. На рис. 4, в и г хорошо видно, что под слоем растрескавшейся керамики модель имеет достаточно шероховатую поверхность, не свойственную модели до нанесения керамики, - это говорит о протекании взаимодействия модели со связующим. Причины разрушения в данном случае те же, что описаны ранее для модели из модельного состава #2 с покрытием на основе ремонтного воска. Что же касается покрытий на основе лака (#Л и #Л + К), то во всех случаях образования наплывов не наблюдалось и для обоих модельных составов #2 и #5 были получены качественные керамические формы. Пример качественной формы, полученной с использованием модели из модельного состава с диметилглиоксимом (#5) и покрытой лаком (#Л), представлен на рис. 4, ∂.

На рис. 5 представлены фотографии образцов из сплава ВЖЛ14Н-ВИ, залитых в керамические формы, полученные с использованием модельных масс #2 и #5 с покрытиями на основе ремонтного воска, лака и лака с канифолью. Как было указано выше, получить форму с применением модельного состава с добавкой диметилглиоксима (#5) и покрытием на основе ремонтного воска (#В) не удалось. Несмотря на то, что форма, полученная с использованием модельной массы с добавками сульфата магния и поливинилового спирта (#2) с покрытием на основе воска, не разрушилась, на поверхности отлитых образцов имелся пригар (рис. 5, а), образовавшийся из-за разрушения поверхностного слоя керамики и пропитки разрушенного слоя расплавом. Ранее было показано (см. рис. 4, *a*), что при формировании слоев формы наблюдались локальные вздутия оболочки. Что же касается образцов, покрытых лаком (#Л) и лаком с канифолью (#Л + К) (рис. 5,  $\delta$ —d), то можно видеть, что поверхность всех образцов не имеет дефектов. Это подтверждает высокие зашитные свойства лака.

На рис. 6 показаны шлифы образцов, представленных на рис. 5, в поперечном сечении. Можно видеть, что толщина пригара на образце, полученном в форме, где в качестве модельной массы использовался состав #2, а модель была покрыта защитным слоем на основе ремонтного воска

#### Известия вузов. Цветная металлургия • 2025 • Т. 31 • № 1 • С. 41-57

Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Никитина А.А. и др. Влияние покрытий для карбамидных моделей на качество оболочковых форм...



Рис. 5. Фотографии поверхности отлитых образцов,

полученных в керамических формах с использованием модельных масс #2 (*a*-*b*) и #5 (*c*, д) с защитными покрытиями на основе ремонтного воска #В (*a*), лака #Л (*б*, *c*) и лака с канифолью #Л + К (*b*, *d*) #2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта; #5 – 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

**Fig. 5.** Surface photographs of cast samples produced in ceramic molds using pattern compounds #2(a-e) and  $\#5(e, \partial)$  with protective coatings based on repair wax #W(a), varnish  $\#V(\delta, e)$ , and varnish with rosin  $\#V + R(e, \partial)$ 

#2 - 96 % urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol; #5 - 88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime



Рис. 6. Микроструктура (ОМ) шлифов (поперечное сечение) отлитых образцов, полученных в керамических формах с использованием модельных масс #2 (*a*-*e*) и #5 (*e*, *d*) с защитными покрытиями на основе ремонтного воска #В (*a*), лака #Л (*б*, *e*) и лака с канифолью #Л + К (*e*, *d*) #2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта; #5 – 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

Fig. 6. Microstructure (OM) of cross-sectioned as-cast samples produced in ceramic molds using pattern compounds #2(a-e) and  $#5(e, \partial)$  with protective coatings based on repair wax #W(a), Varnish #V(b, e), and Varnish with Rosin  $#V + R(e, \partial)$ #2-96% urea + 2\% magnesium sulfate + 2\% polyvinyl alcohol;

#5 - 88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

(рис. 6, *a*), составляет ~1 мм. Остальные образцы, где в качестве защитного покрытия на модельном составе использовался лак (#Л) и лак с канифолью (#Л + K) (рис. 6,  $\delta$ — $\partial$ ), имеют незначительное количество дефектов на поверхности.

На рис. 7 представлены значения шероховатости поверхности отлитых образцов, полученных в керамических формах с использованием модельных масс с добавками сульфата магния и поливинилового спирта (#2), а также нитрата калия с диметилглиоксимом (#5), покрытых защитными составами на основе ремонтного воска, лака и лака с канифолью. Минимальное значение шероховатости (Rz = 24 мкм) было получено для отлитых образцов, при получении которых применялись модельная масса с добавкой нитрата калия и ди-



**Рис.** 7. Шероховатость поверхности отлитых образцов, полученных в керамических формах с использованием модельных масс #2 и #5 с защитными покрытиями на основе ремонтного воска (#В), лака (#Л) и лака с канифолью (#Л + K)

#2 — 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта;

#5-88% карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметил<br/>глиоксима

**Fig. 7.** Surface roughness of as-cast samples produced in ceramic molds using pattern compounds #2 and #5 with protective coatings based on repair wax (#W), varnish (#V) and varnish with rosin (#V + R)

#2-96% urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol; #5-88% urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

метилглиоксима (#5) и покрытия на основе лака. При этом использование аналогичных покрытий на модельном составе #2, с добавками сульфата магния и поливинилового спирта, обеспечило чуть бо́льшие значения шероховатости ( $R_z = 29$ ÷ ÷36 мкм). Литой образец, при получении которого покрытием на модели #2 служил состав на основе ремонтного воска, показал аналогичную шероховатость Rz = 29 мкм. В данном случае оценивали шероховатость участка поверхности образца без механического пригара. Таким образом, все покрытия обеспечивают близкие значения шероховатости литых образцов  $R_z = 24 \div 36$  мкм. По всей видимости, это связано с тем, что после удаления модели и прокалки никаких следов покрытия не остается, а шероховатость полностью определяется характеристиками суспензии и наполнителя, используемых при получении керамической формы.

На рис. 8, а представлена микроструктура образца (СЭМ), отлитого в керамическую форму, полученную с использованием модельной массы #2 (96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта) с покрытием на основе ремонтного воска. Можно видеть, что в месте, где качественная поверхность образца переходит в пригар, имеются поднутрения. Микроструктура такого поднутрения при большем увеличении, а также карты распределения ряда элементов в этой области приведены на рис. 8, б-д. По результатам микрорентгеноспектрального анализа в поднутрениях находятся частицы, содержащие Si и O. Таким образом, можно предположить, что это частицы наполнителя керамической формы, которые отделились от формы в момент извлечения из нее отливки. Это подтверждает предположение, что рассмотренные ранее наплывы, наблюдаемые при получении формы, образуются из-за отслоения слоев керамики.

Для химически активных расплавов важное значение имеет оценка их взаимодействия с материалами формы. На рис. 9, а представлена микроструктура контактного слоя в поперечном сечении на поверхности керамической формы, полученной с использованием модельной массы #5 (88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима) с покрытием на основе лака (#Л). В соответствии с картами распределения Si и O (рис. 9, би в) керамика имеет достаточно четкую границу. На ее поверхности находится слой, богатый Сг и Fe (рис. 9,  $\partial$  и *e*), толщиной не более 50 мкм. Следует отметить, что слой не сплошной, что может быть связано с его недостаточной прочностью и частичным разрушением в процессе приготовления металлографического шлифа. Известно, что хром обладает высокой упругостью пара и при заливке оседает на поверхности формы, попутно взаимодействуя с кислородом воздуха. Таким образом, каких-либо признаков взаимодействия расплава с формой не обнаружено. Как было указано ранее, применяемые покрытия полностью удаляются в процессе прокалки керамической формы.

Результаты лазерного сканирования отлитых образцов, полученных в керамических формах с применением модельных масс с добавками сульфата магния и поливинилового спирта (#2) и нитрата калия с диметилглиоксимом (#5), покрытых защитными составами на основе ремонтного воска, лака и лака с канифолью, представлены на рис. 10. Видно, что при использовании покрытия на основе ремонтного воска (#В) величина откло-

#### Известия вузов. Цветная металлургия • 2025 • Т. 31 • № 1 • С. 41-57

Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Никитина А.А. и др. Влияние покрытий для карбамидных моделей на качество оболочковых форм...



**Рис. 8.** Микроструктура образца, отлитого в керамическую форму, полученную с использованием модельной массы #2 с покрытием на основе ремонтного воска (#В) (*a*), увеличенный участок микроструктуры (*б*) и карты распределения Ni (*a*), Si (*c*), O (*d*)

Модельный состав #2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта

**Fig. 8.** Microstructure of the sample cast in a ceramic mold produced using pattern compound #2 with a repair wax-based coating (#W) (*a*), magnified microstructure area ( $\boldsymbol{\delta}$ ), and elemental distribution maps of Ni (*s*), Si (*z*), and O ( $\boldsymbol{\partial}$ ) Pattern composition #2 – 96 % urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol



**Рис. 9.** Микроструктура контактного слоя керамической формы, полученной с использованием модельной массы #5 с покрытием на основе лака (#Л), после заливки сплава (*a*) и карты распределения Si (*б*), O (*b*), Ni (*c*), Cr (*d*), Fe (*e*) Модельный состав #5 – 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

**Fig. 9.** Microstructure of the contact layer of the ceramic mold produced using pattern compound #5 coated with varnish (#V) after alloy pouring (*a*) and EDS maps of Si ( $\delta$ ), O ( $\theta$ ), Ni ( $\epsilon$ ), Cr ( $\partial$ ), Fe (e) Pattern composition #5 – 88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

#### Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy • 2025 • Vol. 31 • No. 1 • P. 41–57

Bazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Nikitina A.A. et al. Influence of coatings for urea-based patterns on the quality of shell molds produced...



**Рис. 10.** Отклонения размеров отлитых образцов, полученных в керамических формах с использованием модельных масс #2 (*a*-*b*) и #5 (*c*, *d*) с защитными покрытиями на основе ремонтного воска #В (*a*), лака #Л (*б*, *c*) и лака с канифолью #Л + К (*b*, *d*)

#2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта;

#5 – 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

**Fig. 10.** Dimensional deviations of as-cast samples produced in ceramic molds using pattern compounds #2(a-e) and  $\#5(e, \partial)$  with coatings based on repair wax #W(a), varnish #V(b, e), and varnish with rosin  $\#V + R(e, \partial)$ 

#2-96 % urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol;

#5-88 % urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

нений размеров в положительную сторону доходит до 2,5 мм (рис. 10, *a*). Эти отклонения обусловлены наличием наплывов, образовавшихся вследствие изменения геометрии формы при формировании первых слоев керамики.

В случае покрытий на основе лака (#Л) и лака с канифолью (#Л + К) (рис. 10,  $\delta$ —е) наблюдаются отклонения как в положительную, так и в отрицательную сторону, не превышающие 1 мм. По всей видимости, эти отклонения связаны именно с линейной усадкой образцов. К сожалению, определить влияние наличия покрытия на размерную точность не представляется возможным, так как получение формы с использованием карбамидного модельного состава и суспензии на водном связующем без покрытия неосуществимо. Но с учетом малой толщины защитного слоя (менее 100 мкм) покрытие не может повлиять на размерную точность отливок.

Результаты лазерного сканирования отлитых образцов были использованы для определения линейной усадки. На рис. 11 представлены результаты определения линейной усадки литых образцов, полученных в керамических формах с применением модельных масс с добавками сульфата магния и поливинилового спирта (#2), а также нитрата калия с диметилглиоксимом (#5), покрытых защитными составами на основе ремонтного воска, лака и лака с канифолью. При использовании покрытия на основе ремонтного воска (#В) линейная усадка составила всего 1,5 %, а с покрытиями на основе лака (#Л и #Л + К) — в диапазоне 2,0-2,3 %. В случае применения покрытия #В малая величина усадки связана с отслоением и наплывами при нанесении первых слоев формы. В работе [21] было показано, что линейная усадка модельных составов #2 и #5 составляет 0,55 и 0,3 % соответственно. Несмотря на это, сложно увидеть значимое различие в суммарной усадке отлитых образцов в зависимости от применяемого модельного состава. В целом же можно сказать, что суммарная усадка керамической формы и самого сплава в среднем имеет величину ~1,7 %, что практически не отличается от значения, характерного для керамических форм, получаемых с применением гидролизованного раствора этилсиликата, а также водных связующих, но при использовании восковых моделей.

В производственных условиях ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) были изготовлены крупногабаритные отливки «Корпус наружный» и «Корпус внутренний» из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ. Для изготовления отливок использовали водорастворимые модели из модельного состава на основе карбамида с защитным гидрофобным покрытием на основе лака с канифолью. Максимальный габаритный размер полученных отливок составил 1136 мм. Применение защитного покрытия #Л + К позволило получить оболочковые формы с использованием огнеупорной суспензии, приготовленной на основе готового водного



**Рис. 11.** Линейная усадка отлитых образцов, полученных в керамических формах с использованием модельных масс #2 и #5 с защитными покрытиями на основе ремонтного воска (#В), лака (#Л) и лака с канифолью (#Л + K)

#2 – 96 % карбамида + 2 % сульфата магния + 2 % поливинилового спирта;

#5 — 88 % карбамида + 10 % нитрата калия + 2 % диметилглиоксима

Fig. 11. Linear shrinkage of as-cast samples produced in ceramic molds using pattern compounds #2 and #5 with protective coatings based on repair wax (#W), varnish (#V), and varnish with rosin (#V + R)

#2 - 96% urea + 2 % magnesium sulfate + 2 % polyvinyl alcohol; #5 - 88% urea + 10 % potassium nitrate + 2 % dimethylglyoxime

связующего, не уступающие полученным с применением традиционной технологии, основанной на использовании гидролизованного раствора этилсиликата в качестве связующего. Отливки соответствовали техническим требованиям по геометрии и механическим свойствам.

# Выводы

1. Краевой угол смачивания водного связующего на поверхности исследуемых модельных составов увеличился с 3—15° до 20—30° в случае применения защитных покрытий на основе ремонтного воска, лака, а также лака с канифолью. При этом значимого влияния типа покрытия на краевой угол смачивания не обнаружено. Во всех случаях (с покрытием и без) наибольшее значение θ получено при использовании модельной массы с добавкой диметилглиоксима. 2. Минимальная площадь растекания 90— 130 мм<sup>2</sup>, соответствующая минимальному взаимодействию связующего с модельным составом, была получена при использовании покрытий на основе лака, а также лака с канифолью. В случае покрытия на основе ремонтного воска площадь растекания составила 170—180 мм<sup>2</sup>. Изменение состава модельной массы за счет различных добавок, вероятнее всего, не оказывает существенного влияния на площадь растекания водного связующего по поверхности образцов модельных масс.

**3.** Использование защитных покрытий на основе ремонтного воска при получении керамических форм на водном связующем привело к образованию наплывов и трещин, что не позволило получить форму с моделью, где в составе модельной массы была добавка диметилглиоксима (состав #5). Форму с использованием модели из модельного состава #2 (с добавками сульфата магния и поливинилового спирта) получить удалось, но на ней наблюдались частичное разрушение формообразующей поверхности и наплывы. Формы, где в качестве покрытия использовались лак и лак с канифолью, не имели видимых дефектов и проблем при их изготовлении.

4. Полученные в изготовленных формах отливки из никелевого жаропрочного сплава, где в качестве защитных покрытий на моделях использовались лак и лак с канифолью, не имели видимых дефектов и обладали шероховатостью  $Rz = 25 \div 35$  мкм. Отливка, полученная в форме, где в качестве защитного покрытия применялся состав на основе ремонтного воска, обладала механическим пригаром, в котором были обнаружены частицы керамической формы. Также она имела значительные отклонения по размерам (из-за образования наплывов, связанных с разрушением формообразующего слоя).

5. Линейная усадка отливок, полученных с использованием форм, где на модель наносились покрытия на основе лака и лака с канифолью, оказалась выше, чем в случае нанесения покрытия на основе ремонтного воска. Это также связано с образованием пузырей и наплывов на поверхности модели в момент формирования слоев формы.

# Список литературы/References

 Kanyo J.E., Schafföner S., Uwanyuze R.S., Leary K.S. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys. *Journal of the European Ceramic Society*. 2020;40(15):4955–4973. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013  Selvaraj S.K., Sundaramali G., Dev S.J., Swathish R.S., Karthikeyan R., Vishaal K.E.V., Paramasivam V. Recent advancements in the field of Ni-based superalloys. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021;Dec.2021:9723450.

https://doi.org/10.1155/2021/9723450

 Kumar S., Karunakar D.B. Development of wax blend pattern and optimization of injection process parameters by grey-fuzzy logic in investment casting process. *International Journal of Metalcasting*. 2022;16: 962–972.

https://doi.org/10.1007/s40962-021-00655-y

Pradyumna R., Sridhar S., Satyanarayana A., Chauhan A.S., Baig M.A.H. Wax patterns for integrally cast rotors/stators of aeroengine gas turbines. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(4–5):1714–1722.

https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.005 5. Прокопчук Н.Р., Горщарик Н.Д., Клюев А.Ю., Коз-

лов Н.Г., Рожкова Е.И., Латышевич И.А., Бакович Н.А. Модельные составы для точного литья. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2015;4:122—128.

Prokopchuk N.R., Gorshcharik N.D., Klyuev A.Yu., Kozlov N.G., Rozhkova E.I., Latyshevich I.A., Bakovich N.A. Pattern compounds for high precision casting. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk.* 2015;4:122–128. (In Russ.).

- 6. Дубровский В.А. Модельная композиция для выплавляемых моделей: Патент 2123902 (РФ). 1997.
- Усков Д.И. Стержневой состав для получения прецизионных отливок. В сб: Молодежь и наука: Материалы X Юбилейной Всеросс. науч.-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края (15—25 апреля 2014 г.). Красноярск: СФУ, 2014. С. 1—4.
- Громаков А.И., Михнев М.М., Усков Д.И. Смесь для изготовления водорастворимых стержней. В сб: Материалы Международной научной конференции «Решетневские чтения» (9—12 ноября 2016 г.). Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, 2016. Т. 2. С. 332—333.
- Fujitta T. Pattern material for making foundry patterns for use in investments casting process: Patent 4939187 (USA). 1990.
- Стадничук В.И. Способ изготовления керамических форм по растворяемым моделям: Патент 2499651 (РФ). 2012.
- Лакеев А.С., Щегловитов Л.А., Кузьмин Ю.Д. Прогрессивные способы изготовления точных отливок. Киев: Техника, 1984. 160 с.

- 12. Сумин Е.И., Андрианов Л.П. Композиция для изготовления водорастворимых моделей: Авт. св-во 602288 (СССР). 1976.
- Seyedraoufi Z.S., Mirdamadi Sh. Synthesis, microstructure and mechanical properties of porous Mg—Zn scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;21:1—8. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.01.023
- Wen C.E., Yamada Y., Shimojima K., Chino Y., Hosokawa H., Mabuchi M. Compressibility of porous magnesium foam: dependency on porosity and pore. *Materials Letters*. 2004;58(3–4):357–360. https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00500-7
- Hao G.L., Han F.S., Li W.D. Processing and mechanical properties of magnesium foams. *Journal of Porous Materials*. 2009;16:251–256. https://doi.org/10.1007/s10934-008-9194-y
- Marutani Y., Kamitani T. Manufacturing sacrificial patterns for casting by salt powder lamination. *Rapid Prototyping Journal*. 2004;10(5):281–287. https://doi.org/10.1108/13552540410562313
- 17. Rutto H.K. Urea-based moulding compounds for investment casting: Thesis for the degree Philosophiae Doctor in Chemical Engineering. Pretoria: University of Pretoria, 2006.
- Литье по выплавляемым моделями. Под ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 436 с.
- Чуркин Б.С., Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И. Специальные способы литья: Учеб.-метод. пос. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2012. 189 с.
- Rutto H., Focke W. Thermomechanical properties of urea-based pattern molding compounds for investment casting. *International Polymer Processing*. 2010;25(1): 15-22. https://doi.org/10.3139/217.2256
- Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Никитина А.А., Колтыгин А.В. Влияние различных добавок на свойства солевых водорастворимых модельных масс на основе карбамида. Цветные металлы. 2024;8: 82—90. https://doi.org/10.17580/tsm.2024.08.12 Bazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Nikitina A.A., Koltygin A.V. Influence of various additives on the properties of salt water-soluble carbamide-based pattern compounds. *Tsvetnye metally*. 2024;8:82—90. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/tsm.2024.08.12
- Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Колтыгин А.В., Белов В.Д., Дмитриев Д.Н. Разработка разделительного состава для растворяемых солевых моделей при литье по выплавляемым моделям. Литейное производство. 2023;(6):30—37.

Bazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Koltygin A.V., Be-

lov V.D., Dmitriev D.N. Development of isolating composition for soluble salt models for investment casting. *Liteinoe proizvodstvo.* 2023;(6):30–37. (In Russ.).

- Стадничук В.И., Бессмертный В.С. Формирование защитных гидрофобных пленок на рабочей поверхности литейных керамических форм. Огнеупоры и техническая керамика. 2011;(4-5):8-10.
   Stadnichuk V.I., Bessmertnyi V.S. Formation of protective hydrophobic films on the working surface of foundry ceramic molds. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika. 2011;(4-5):8-10. (In Russ.).
- 24. Караник Ю.А. Способ изготовления отливок из черных и цветных металлов: Патент 2048955 (РФ). 1995.
- 25. Васин Ю.П., Евсеева Т.М., Лонзингер В.А., Аверьянов Е.Ф., Сезганов А.Н., Розовский Л.Д., Хохлова Е.В. Способ изготовления форм при литье по выплавляемым моделям: Авт. св-во 1310098 (РФ). 1985.

- 26. Колтыгин А.В., Белов В.Д., Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Фадеев А.В. Раствор для улучшения смачивания поверхности восковых моделей для литья по выплавляемым моделям: Заявка на патент 2023110773 (РФ). 2023.
- 27. Баженов В.Е., Ковышкина Е.П., Санников А.В., Колтыгин А.В., Тен Д.В., Рижский А.А., Белов В.Д., Лазарев Е.А. Анализ свойств суспензии и керамики для литья по выплавляемым моделям, полученных на отечественных связующих на водной основе. Известия вузов. Цветная металургия. 2023;29(2):15—28. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-15-28 Bazhenov V.E., Kovyshkina E.P., Sannikov A.V., Koltygin A.V., Ten D.V., Rizhsky A.A., Belov V.D., Lazarev E.A. Analysis of the slurry and ceramic properties for investment casting obtained with domestic colloidal silica binders.
  - *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy.* 2023;29(2):15–28. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-15-28

# Информация об авторах

Вячеслав Евгеньевич Баженов – к.т.н., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС). https://orcid.org/0000-0003-3214-1935 E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Елена Павловна Ковышкина – аспирант кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0001-8603-1630 E-mail: Kovyshkina@ic-ltm.ru

Анна Андреевна Никитина — учебный мастер кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0002-5399-0330 E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Юрий Всеволодович Целовальник – к.т.н., ст. преподаватель кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0001-9102-016X E-mail: tselovalnikyuri@gmail.com

Анастасия Андреевна Белова — аспирант кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0009-0008-4199-8942 E-mail: belova@ic-ltm.ru

**Андрей Вадимович Колтыгин** – к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0002-8376-0480 E-mail: misistlp@mail.ru

# Information about the authors

Viacheslav E. Bazhenov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of Foundry Technologies and Material Art Working (FT&MAW), National University of Science and Technology "MISIS" (NUST MISIS). https://orcid.org/0000-0003-3214-1935 E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Elena P. Kovyshkina – Postgraduate Student, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0001-8603-1630 E-mail: Kovyshkina@ic-ltm.ru

Anna A. Nikitina – Laboratory Assistant, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0002-5399-0330 E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Yuri V. Tselovalnik – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0001-9102-016X E-mail: tselovalnikyuri@gmail.com

Anastasia A. Belova – Postgraduate Student, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0009-0008-4199-8942 E-mail: belova@ic-ltm.ru

Andrey V. Koltygin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0002-8376-0480 E-mail: misistlp@mail.ru **Владимир Дмитриевич Белов** — д.т.н., заведующий кафедрой ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0003-3607-8144 E-mail: vdbelov@mail.ru

Борис Евгеньевич Хвацков — вед. специалист отдела инновационного развития службы генерального конструктора, ПАО «ОДК-Кузнецов». E-mail: be.hvatskov@uec-kuznetsov.ru

# Вклад авторов

**В.Е. Баженов** – формирование основной концепции, обработка результатов исследований, написание текста статьи.

**Е.П. Ковышкина** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

**А.А. Никитина** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

**Ю.В. Целовальник** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

**А.А. Белова** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

**А.В. Колтыгин** – научное руководство, редактирование текста статьи.

**В.Д. Белов** – общее руководство, редактирование текста статьи.

**Б.Е. Хвацков** – формулировка цели и задачи исследований, обеспечение ресурсами.

Vladimir D. Belov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0003-3607-8144 E-mail: vdbelov@mail.ru

**Boris E. Hvatskov** – Senior Expert of the Innovations Development Department of the General Constructor's Division, PJSC "UEC-Kuznetsov". E-mail: be.hvatskov@uec-kuznetsov.ru

# **Contribution of the authors**

**V.E. Bazhenov** – development of the main concept, analysis of research results, and manuscript writing.

**E.P. Kovyshkina** – conducting experiments and analysis of research results.

**A.A.** Nikitina – conducting experiments and analysis of research results.

**Yu.V. Tselovalnik** – conducting experiments and analysis of research results.

**A.A. Belova** – conducting experiments and analysis of research results.

A.V. Koltygin – scientific supervision and manuscript editing.

V.D. Belov – general supervision and manuscript editing.

**B.E. Hvatskov** – defining the research objectives and tasks, and resource provision.

Статья поступила в редакцию 05.06.2024, доработана 10.08.2024, подписана в печать 13.08.2024 The article was submitted 05.06.2024, revised 10.08.2024, accepted for publication 13.08.2024