

УДК 621.74.045

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-15-28>

Научная статья

Research article



## Анализ свойств суспензии и керамики для литья по выплавляемым моделям, полученных на отечественных связующих на водной основе

В.Е. Баженов<sup>1</sup>, Е.П. Ковышкина<sup>1</sup>, А.В. Санников<sup>1</sup>, А.В. Колтыгин<sup>1</sup>, Д.В. Тен<sup>1</sup>, А.А.Рижский<sup>1</sup>, В.Д. Белов<sup>1</sup>, Е.А. Лазарев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Публичное акционерное общество ОДК «Кузнецов»  
443009, Россия, г. Самара, Заводское шоссе, 29

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

**Аннотация:** Качество литых деталей, изготовленных методом литья по выплавляемым моделям, в значительной мере определяется качеством керамических форм. В настоящее время предприятия авиа- и двигателестроения переходят на экологически безопасное водное связующее для изготовления керамических форм. В работе определены динамическая и условная вязкости суспензий, приготовленных с использованием пылевидного плавленного кварца и отечественных водных связующих марок ВТ13-02У (ООО «Вакуумтех»), Ставроформ ВС (ООО «Полимет»), UltraCast One+ и UltraCast Prime (ООО «Технопарк»). Показано, что полученные суспензии имеют близкие значения вязкости и по своим реологическим свойствам близки к ньютоновским жидкостям. Значения динамической и условной вязкости при содержании связующего 400 мл на 1 кг пылевидного кварца составили ~732 мПа·с и ~380 с соответственно. При увеличении содержания связующего до 600 мл на 1 кг пылевидного кварца вязкость снизилась до ~70 мПа·с и ~16 с соответственно. Также было выведено уравнение, связывающее динамическую вязкость, определенную с помощью ротационного вискозиметра, и условную вязкость, установленную с помощью прибора ВЗ-4. Были определены механические свойства при испытаниях на трехточечный изгиб керамических образцов, полученных с использованием суспензий на указанных выше связующих и обсыпки из плавленного кварца. Образцы, полученные на связующих ВТ13-02У, Ставроформ ВС и UltraCast One+, показали очень близкие значения прочности: 3,5–4,3 МПа после сушки и 5,8–6,1 МПа после прокали. Из-за наличия в составе связующего полимерной добавки керамические образцы на связующем UltraCast Prime имели более высокие значения прочности на изгиб после сушки и после прокали – 6,4 и 7,2 МПа соответственно. Также было показано, что с увеличением вязкости суспензии и уменьшением фракции плавленного кварца прочность керамических образцов возрастает. Из всех рассмотренных связующих наименьшая шероховатость поверхности наблюдалась у образцов, полученных с использованием связующих UltraCast.

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, жаропрочные никелевые отливки, водные связующие, пылевидный кварц плавленный (ПКП), суспензия, вязкость, механические свойства

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 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., 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 металлургия*. 2023;29(2):15–28. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-15-28>

# Analysis of the slurry and ceramic properties for investment casting obtained with domestic colloidal silica binders

V.E. Bazhenov<sup>1</sup>, E.P. Kovyshkina<sup>1</sup>, A.V. Sannikov<sup>1</sup>, A.V. Koltygin<sup>1</sup>, D.V. Ten<sup>1</sup>,  
A.A. Rizhsky<sup>1</sup>, V.D. Belov<sup>1</sup>, E.A. Lazarev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Public Joint Stock Company UEC “Kuznetsov”  
29 Zavodskoe shosse, Samara 443009, Russia

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

**Abstract:** The quality of cast parts produced by investment casting is largely determined by the quality of the ceramic molds. Currently, aircraft and engine building enterprises are switching to an environmentally friendly colloidal silica binders for the manufacture of ceramic molds. In this work, the dynamic and relative viscosity of slurries prepared using fused silica powder and colloidal silica binders of the VT13-02U (Vakuumteh LLC), Stavroform VS (Polymet LLC), UltraCast One + and UltraCast Prime (both Technopark LLC) manufacturers were determined. It is shown that the slurries prepared on the considered binders have similar viscosity values, and in their rheological properties they are close to Newtonian liquids. The values of dynamic and relative viscosity at a binder content of 400 mL per 1 kg of fused silica powder were  $\sim 732$  mPa·s and  $\sim 380$  s, respectively. With an increase in the binder content to 600 mL per 1 kg of fused silica powder, the dynamic and relative viscosity decreased to  $\sim 70$  mPa·s and  $\sim 16$  s, respectively. An equation was also found that relates the dynamic viscosity determined using a rotational viscometer and the relative viscosity determined using the VZ-4 viscosimeter. The mechanical properties were determined during three-point bending tests on ceramic samples obtained using slurries on the above-mentioned colloidal silica binders and fused silica stucco. Samples obtained on binders VT13-02U, Stavroform VS and UltraCast One+ showed very similar bending strength values, namely 3.5–4.3 MPa after drying and 5.8–6.1 MPa after firing. Due to the presence of a polymer addition in the binder, the ceramic samples obtained on the UltraCast Prime binder had higher values of bending strength after drying and after firing – 6.4 and 7.2 MPa, respectively. It was also shown that with an increase in the viscosity of the slurry and a decrease in the fraction of fused silica stucco, the strength of the samples increases. The lowest surface roughness was observed for samples obtained with UltraCast grade binders.

**Keywords:** investment casting, nickel superalloy castings, colloidal silica binder, fused silica powder, slurry, viscosity, mechanical properties

**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 9 April 2010.

**For citation:** 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. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-15-28>

## Введение

Надежность авиационных двигателей определяется качеством литых изделий, которое в том числе зависит от качества керамических форм для литья по выплавляемым моделям. Форма должна обеспечить высокую размерную точность и чистоту поверхности получаемых отливок [1, 2].

При изготовлении керамических форм для крупногабаритных отливок из никелевых жаропрочных сплавов методом литья по выплавляемым моделям в основном используются два типа связующих: первый — на основе гидролизованного раствора этилсиликата, где растворителем обычно является этанол или комбинации этанола и изопропанола, а второй — это водный коллоид-

ный раствор кремнезема (кремнезоль) [3]. В настоящее время наблюдается переход предприятий на использование связующих на основе коллоидного кремнезема на водной основе [4]. Они содержат частицы аморфного SiO<sub>2</sub>, стабилизированные Na. Гелеобразование кремнезоля и связывание частиц наполнителя в керамической форме достигаются удалением влаги [5–7].

Из-за высокой пожарной опасности органических растворителей связующие на гидролизованном растворе этилсиликата не применяются в производствах с высокой степенью автоматизации и роботизации. Кроме того, новые нормативные акты по охране окружающей среды также вынуж-

дают предприятия выводить этилсиликат из технологического процесса, так как органические растворители и пары аммиака, в которых происходит отверждение керамических форм, существенно ухудшают условия труда [5, 7, 8]. Экологически безопасное водное связующее позволяет улучшить экологическую обстановку в литейных цехах, внедрить современное технологическое оборудование и снизить себестоимость отливок [9–12].

Для изготовления керамических оболочек, применяемых при литье крупногабаритных никелевых отливок из жаропрочных сплавов, можно использовать пылевидный кварц для приготовления суспензии и зернистый кварц различных фракций как материал для обсыпки литейных блоков [13, 14]. Корунд в качестве обсыпки обычно не применяется из-за его высокой плотности и большого веса получаемых форм. Как правило, кварц используют в аморфном состоянии (плавленый кварц), так как он имеет в ~27 раз меньший коэффициент термического расширения в сравнении с кристаллическим кварцем [15, 16].

Водные связующие, по сравнению со связующими на гидролизованном растворе этилсилката, имеют следующие недостатки: склонность к седиментации, медленное высыхание слоя суспензии, плохую смачиваемость восковых модельных блоков [10]. По этой причине в состав суспензии, а иногда и непосредственно в связующее, добавляются дополнительные компоненты, такие как полимерные добавки, поверхностно-активные вещества (ПАВ), пеногасители, добавки, препятствующие гелеобразованию, индикаторы для контроля сушки керамических слоев [17]. Прочность керамики, полученной с использованием современных связующих на гидролизованном этилсилкаты или на водной основе, примерно одинакова [5].

Одним из ключевых факторов, определяющих качество поверхности керамической формы, является вязкость суспензии первого слоя керамики [18, 19]. При увеличении динамической вязкости суспензии слои становятся толще, что затрудняет их сушку и может привести к растрескиванию форм во время этого процесса [20]. На динамическую вязкость суспензии влияют несколько факторов, в том числе температура, размер частиц наполнителя и его доля [20].

Наиболее важным параметром для керамической формы является прочность. Она должна быть достаточной как в сыром состоянии, чтобы выдерживать удаление модели без разрушения, так и в прокаленном, чтобы выдержать вес литого металла.

Но при этом прочность в прокаленном состоянии должна быть не слишком высокой, чтобы предотвратить образование трещин в склонных к этому сплавах и облегчить процесс выбивки [3, 21]. Прочность оболочковой формы напрямую зависит от свойств суспензий и применяемой технологии ее приготовления и нанесения. В частности, в случае недостаточного смачивания связующим наполнителя суспензии оболочки не будут обладать требуемой прочностью и могут растрескиваться [19].

Коллоидные связующие в чистом виде позволяют получать керамические формы с очень низкой прочностью в сыром состоянии, которые склонны к растрескиванию во время удаления воска и других манипуляций. Это преодолевается за счет использования жидких полимерных добавок на основе либо латекса для щелочных систем, либо поливинилацетата (ПВА) для кислотных [21, 22].

Фракционный состав обсыпки влияет на газопроницаемость керамической формы, причем газопроницаемость через первый слой является определяющей [22]. В связи с этим необходимо исследовать вязкость суспензий и прочность керамических образцов, полученных при использовании обсыпки различного фракционного состава.

В настоящее время большинство ведущих машиностроительных предприятий применяют в литейном производстве оборудование ведущих мировых производителей, рассчитанное на использование определенных связующих зарубежного производства. В то же время отечественные предприятия производят и поставляют на рынок современные и качественные готовые связующие.

Целью работы являлось исследование вязкости суспензий, полученных с использованием отечественных водных связующих, а также изучение влияния фракции огнеупорного наполнителя на механические свойства образцов керамики и их шероховатость.

## Материалы и методика исследования

### Определение свойств связующих, приготовление суспензий и оценка их вязкости

Для приготовления суспензий использовали следующие водные связующие российского производства: ВТ13-02У (ООО «Вакуумтех», г. Москва), Ставроформ ВС (ООО «Полимет», г. Тольятти), UltraCast One+ и UltraCast Prime (ООО «Технопарк», г. Москва). Их плотность определяли путем взвешивания известного объема связующего,

отмеренного бюреткой (50 мл) на аналитических весах. Определение величины рН осуществляли с помощью рН-метра HI83141 («Hanna Instruments», США).

Суспензии готовили путем смешивания указанных выше связующих в количестве 400 мл с 1 кг пылевидного кварца плавленного (ПКП) фракцией 0,045 мм (ООО «Кефрон», Россия). После замешивания суспензию выдерживали 24 ч для обеспечения смачивания микропорошка связующим и выхода воздуха. Затем ее перемешивали в течение 10 мин для равномерного распределения частиц наполнителя в объеме. Далее проводили измерения вязкости, после чего добавляли по 50 мл связующего с последующим измерением вязкости. Таким образом была определена вязкость суспензии при содержании связующего 400, 450, 500, 550 и 600 мл на 1 кг ПКП.

Вязкость оценивали по двум методикам.

1. Измерение условной вязкости, которая определяется временем истечения суспензии через сопло вискозиметра ВЗ-4 (диаметр и высота сопла по 4 мм) по ГОСТ 9070-75. Измерения повторяли 2–3 раза.

2. Определение динамической вязкости с помощью ротационного вискозиметра DV2TLV («Brookfield», США). Суспензию (связующее) переливали в стеклянный стакан объемом 400 мл. Использовали измерительные шпиндели LV-1 (#61) и LV-3 (#63), обеспечивающие диапазон измерения вязкости  $(15–400) \cdot 10^3$  мПа·с [23]. Вязкость оценивали при скоростях вращения шпинделей 10–200 об/мин.

### Определение фракционного состава образцов пылевидного и плавленного кварца

Исследование фракционного состава плавленного кварца (ПК) проводили путем отсева на ситах с ячейкой различного размера по ГОСТ 29234.3-91. Сеев осуществляли с помощью вибросита модели 01412 (Усманский завод литейного оборудования «Литмашприбор», Россия).

Для определения фракционного состава пылевидного плавленного кварца использовали микрофотографии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3 SBH («Tescan», Чехия). На микрофотографиях определяли площадь отдельных частиц с помощью программы ImageJ 1.52a («National Institutes of Health», США). По значениям площади вычисляли диаметр частиц и их объем. После определяли объемную долю частиц для каждого диапазона фракций.

### Получение образцов, испытания на трехточечный изгиб, оценка шероховатости

Для определения механических свойств изготавливали керамические образцы в виде параллелепипедов для испытаний на изгиб [24]. На основе связующих ВТ13-02У, Ставроформ ВС, UltraCast One+ и UltraCast Prime готовили суспензии с условной вязкостью 20, 40 и 60 с по вискозиметру ВЗ-4. На восковую модель, изготовленную из модельного состава ПС 50-50 (рис. 1), наносили суспензию и производили обсыпку плавленным кварцем: ПК 0,25–0,4 мм, ПК 0,4–0,6 мм и ПК 0,5–1,0 мм производства (ООО Кефрон, Россия). С верхней плоскости (поверхность А) восковой модели срезали свеженанесенную суспензию и обсыпку с помощью ножа. Формирование керамического образца происходило в полости, обозначенной Б. Сушка каждого слоя производилась на воздухе при комнатной температуре в течение 2 ч. Количество наносимых слоев в зависимости от вязкости связующего и фракции плавленного кварца составляло от 5 до 9.

Модель выплавляли в кипящей воде и получали по 6 керамических образцов размером  $40 \pm 1 \times 20 \pm 1 \times 8 \pm 1$  мм для каждого значения условной вязкости суспензии (20, 40 и 60 с) и фракции плавленного кварца (ПК 0,25–0,4 мм, ПК 0,4–0,6 мм и ПК 0,5–1,0 мм). Из 6 получаемых за 1 раз образцов три термообработывали по следующему режиму: нагрев до 900 °С за 1,5 ч, выдержка при этой температуре 2 ч с последующим охлаждением в печи с открытой дверцей. Оставшиеся 3 образца

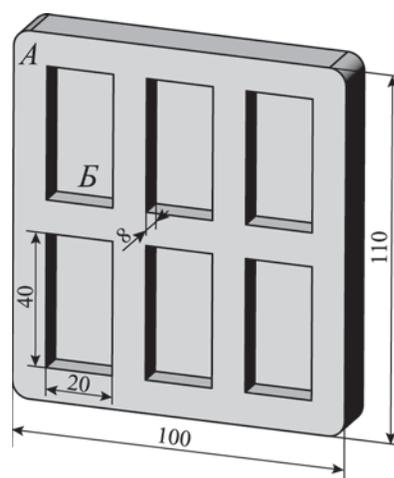


Рис. 1. Восковая модель для получения керамических образцов

Fig. 1. Wax pattern for the production of ceramic samples

испытывали в необожженном (сыром) состоянии после сушки на воздухе в течение 24 ч после изготовления. Внешний вид образцов после прокалики представлен на рис. 2.

Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине 5966 («Instron», США) по ASTM C1161-13. Расстояние



Рис. 2. Керамические образцы после прокалики для механических испытаний

Fig. 2. Ceramic samples for the mechanical tests after firing

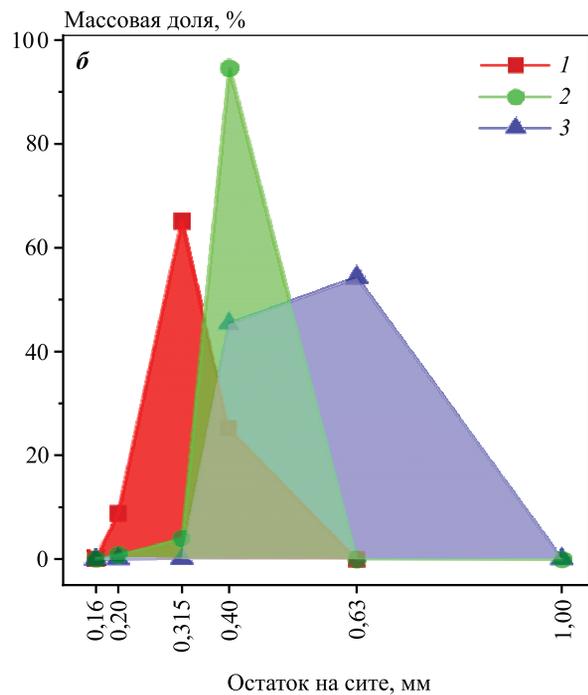
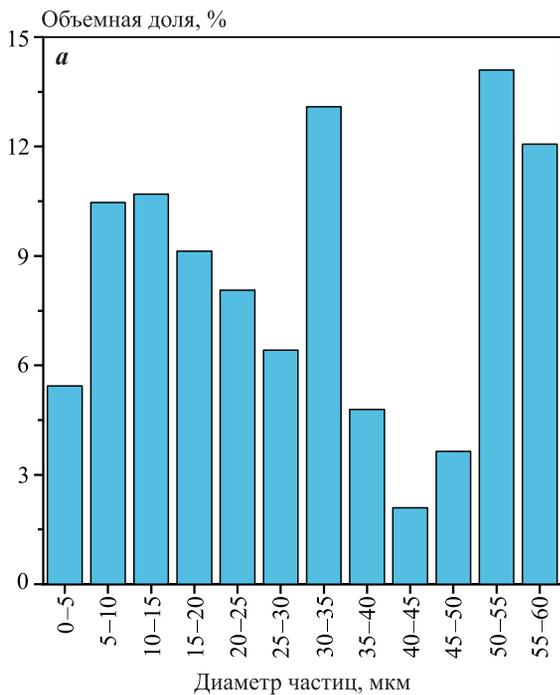


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в пылевидном плавном кварце ПКП 0,045 мм (а) и результаты отсева плавного кварца на ситах (б)

1 – ПК 0,25–0,4 мм, 2 – ПК 0,4–0,6 мм, 3 – ПК 0,5–1,0 мм

Fig. 3. Distribution of FSP 0.045 mm silica powder particles by size (a) and fused silica sieve analysis results (b)

1 – FS 0.25–0.4 mm, 2 – FS 0.4–0.6 mm, 3 – FS 0.5–1.0 mm

между нижними опорами было задано равным 21 мм, скорость нагружения составляла 1 мм/мин.

Шероховатость поверхности образцов исследовали с помощью профилометра M300C («MarSurf», Германия).

## Результаты и их обсуждение

### Характеристики исследуемых связующих

В таблице представлены значения плотности и кислотности исследуемых связующих. Видно, что плотность у них практически одинакова и составляет 1,15–1,16 г/см<sup>3</sup>. Значения pH варьируются от 9,8 до 10,6, что говорит о том, что исследуемые свя-

### Плотность и величина pH исследуемых связующих

The density and pH of investigated binders

Связующее	Плотность, г/см <sup>3</sup>	pH
BT13-02У	1,16	9,8
Ставроформ ВС	1,15	10,2
UltraCast One+	1,16	10,6
UltraCast Prime	1,15	10,3

зующие являются щелочными. Отметим, что полученные значения плотности и рН укладываются в диапазоны, указанные их производителями.

### **Фракционный состав пылевидного и плавленного кварца**

На рис. 3, а представлена объемная доля частиц различного размера в пылевидном плавленном кварце ПКП 0,045 мм. Частицы имеют размер от 0 до 60 мкм, при этом их распределение достаточно неоднородное и не подчиняется закону нормального распределения.

Результаты отсева плавленного кварца на ситах представлены на рис. 3, б. Для образцов ПК 0,25–0,4 мм и ПК 0,4–0,6 мм основная масса навески остается на ситах 0,315 и 0,4 мм соответственно, что отвечает указанным в марке диапазонам. Что же касается плавленного кварца марки ПК 0,5–1,0 мм, то можно видеть, что его частицы практически равномерно распределены между ситами 0,4 и 0,63 мкм. Полученные значения также соответствуют марке ПК 0,5–1,0 мм.

### **Результаты определения вязкости суспензий и связующих**

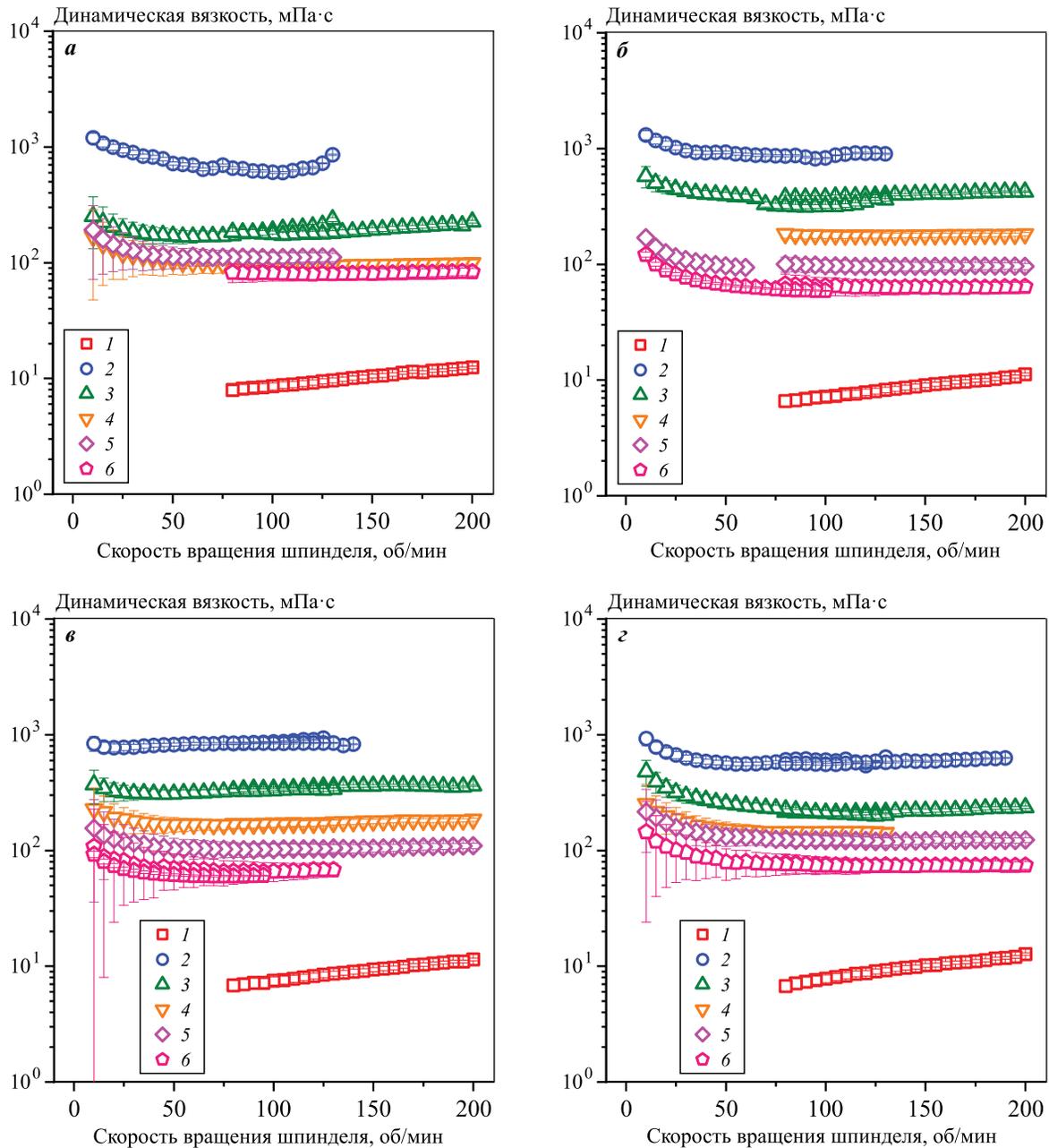
На рис. 4 показана зависимость вязкости суспензии от количества связующего (в мл) на 1 кг пылевидного кварца, а также вязкость самих связующих. В данном случае представлены результаты определения вязкости реологическим методом. Вязкость исследованных связующих возрастает при увеличении скорости вращения шпинделя, что говорит о том, что они ведут себя как неньютоновские жидкости. В то же время значимой разницы вязкости между связующими не наблюдается, и она находится в интервале 6–8 мПа·с при скорости вращения шпинделя  $\nu = 75$  об/мин и 11–13 мПа·с при  $\nu = 200$  об/мин. Известно, что связующие по реологическим свойствам являются неньютоновскими жидкостями, в которых вязкость уменьшается при увеличении скорости сдвига [20]. Но в данном исследовании получилась обратная зависимость, что может быть связано с переходом к турбулентному течению при высоких оборотах шпинделя.

Известно, что более высокая вязкость связующего приводит к повышенной вязкости суспензии при том же соотношении наполнитель/связующее [25], но в рассматриваемом случае вязкость связующих практически одинакова. Авторы работы [20] изучали вязкость связующего Ludox SK аналогичным методом и получили достаточно близкое

значение, равное 7 мПа·с. Из представленных на рис. 4 данных видно, что вязкость суспензий практически не зависит от скорости вращения шпинделя, кроме ее малых значений — до 50 об/мин. Таким образом, по своим реологическим свойствам суспензии близки к ньютоновским жидкостям.

Поскольку в диапазоне скоростей вращения шпинделя 50–200 об/мин вязкость практически не меняется, для суспензии ее определяли как среднее значение в этом диапазоне. Вязкость суспензий, приготовленных на исследуемых связующих материалах при их различном содержании (в мл на 1 кг пылевидного кварца), представлена на рис. 5, а. Видно, что суспензии, приготовленные на большинстве рассмотренных связующих, имеют близкие значения вязкости, и зависимость вязкости от содержания связующего в суспензии имеет логарифмический характер, о чем свидетельствует практически линейная зависимость вязкости, представленной на логарифмической шкале, от содержания связующего. Исключением является марка ВТ13-02У, для которой зависимость вязкости от доли связующего более крутая и значения вязкости в целом чуть ниже. Следует отметить, что все связующие имеют схожее содержание  $\text{SiO}_2$ , а значит, значительной разницы в вязкости полученных на них суспензий наблюдаться не должно. В то же время наличие полимера и других добавок в связующем может способствовать изменению вязкости суспензии [26].

К сожалению, достоверно установить, в чем причина перепадов вязкости, не представляется возможным. Так, в работах [27, 28] указывается, что по мере увеличения времени перемешивания вязкость суспензии также возрастает из-за испарения воды в окружающую среду и тепла, выделяемого в процессе смешивания суспензии, от трения как в самой суспензии, так и в используемом оборудовании. По всей видимости, различия в вязкости связаны с возможными перепадами температурных режимов и влажности в помещении, где проводился эксперимент. Для суспензий, полученных на водных связующих, это особенно важно, так как такие перепады приводят к неодинаковому испарению воды в ходе эксперимента, а значит, и к неодинаковым изменениям вязкости. Обычно различия в вязкости суспензий объясняются различными плотностью и вязкостью связующих, причем последняя оказывает большее влияние на вязкость суспензии, чем плотность [25]. В настоящей работе вязкости и плотности изучаемых связующих достаточно близки, что также



**Рис. 4.** Вязкость суспензии, приготовленной на связующих VT13-02У (а), Ставроформ ВС (б), UltraCast One+ (в) и UltraCast Prime (г), в зависимости от количества связующего

1 – связующее без наполнителя, 2 – 400 мл, 3 – 450 мл, 4 – 500 мл, 5 – 550 мл, 6 – 600 мл

Количество связующего приведено на 1 кг пылевидного кварцевого микропорошка

**Fig. 4.** Viscosity of slurry prepared with binders: VT13-02U (a), Stavroform VS (b), UltraCast One+ (v), UltraCast Prime (z), depending on the amount of binder

1 – binder without refractory, 2 – 400 mL, 3 – 450 mL, 4 – 500 mL, 5 – 550 mL, 6 – 600 mL

The amount of binder is given per 1 kg of silica powder

позволяет предположить, что вязкость суспензий, приготовленных на разных связующих, будет примерно одинакова.

Известно, что вязкость суспензии возрастает с увеличением соотношения наполнитель/связу-

ющее [25]. В рассматриваемом случае увеличение объема связующего с 400 до 600 мл на 1 кг пылевидного кварца приводит к снижению вязкости с 550–870 до 60–80 мПа·с соответственно, т.е. примерно в 10 раз. Реологические свойства суспензии

(вязкость) определяют ее скорость и равномерность стекания с модели или предыдущего слоя керамики [17]. Увеличение вязкости суспензии позволяет получить более толстый первый слой [25].

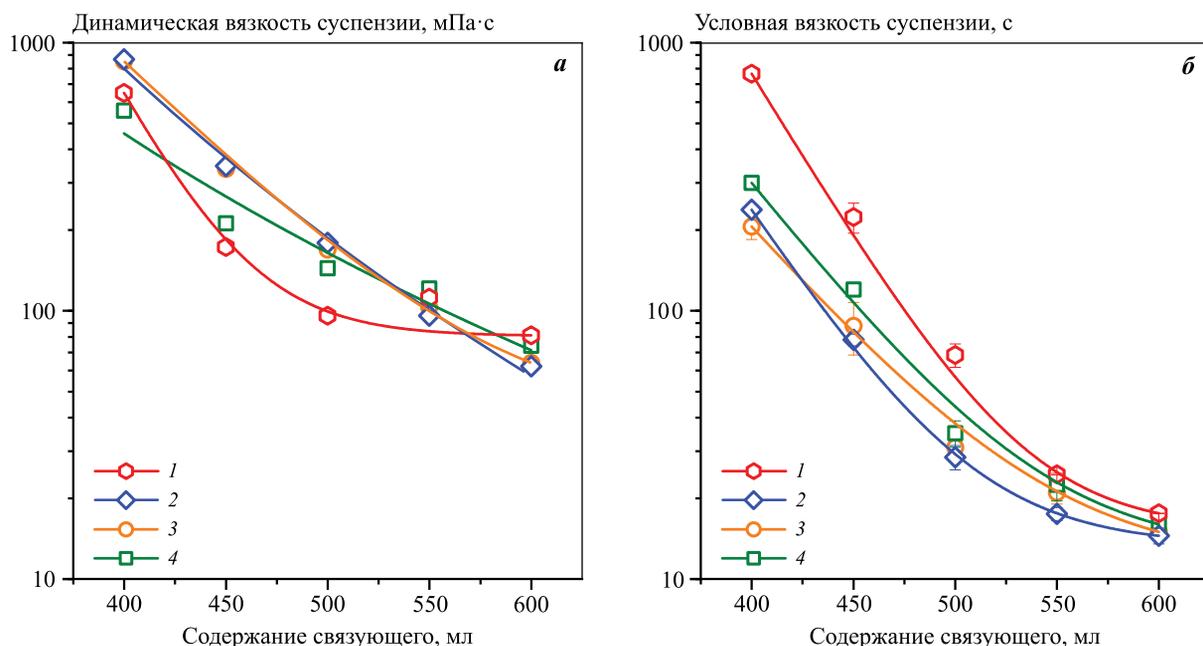
В практике литейного производства принято использовать условную вязкость, которая определяется временем истечения суспензии через отверстие известного диаметра. Результаты определения с помощью вискозиметра ВЗ-4 условной вязкости суспензий, приготовленных на изучаемых связующих, представлены на рис. 5, б. Как и в предыдущем случае, значения вязкости всех рассмотренных суспензий достаточно близки. Исключение, так же как и при определении вязкости с помощью ротационного вискозиметра, составляет суспензия, приготовленная на связующем ВТ13-02У. Только если при использовании ротационного вискозиметра эта суспензия имела меньшую вязкость, чем полученные на других связующих, то в случае применения вискозиметра ВЗ-4 ее значение было значительно выше, чем у остальных.

В целом можно заключить, что зависимость вязкости от содержания связующего (в мл) на 1 кг микропорошка нелинейна. При больших содержаниях связующего вязкость начинает меняться

менее резко. Увеличение объема связующего с 400 до 600 мл на 1 кг пылевидного кварца приводит к снижению вязкости с ~380 до ~16 с соответственно, т.е. примерно в 24 раза.

В технических условиях на изготовление отливок условная вязкость обычно колеблется от 20 до 70 с в зависимости от номера наносимого слоя. Большие значения вязкости соответствуют первым слоям, а меньшие — последующим. Высокая вязкость приводит к формированию более толстого и плотного слоя на модели, что особенно важно при ее недостаточном смачивании, когда наносят первый слой [25, 27]. Также высокая вязкость суспензии обеспечивает низкую шероховатость первого слоя [27]. В работе [18] выявлено, что при условной вязкости суспензии <35 с, вне зависимости от размера зерна обсыпки из плавленного кварца, на поверхности керамической формы образуются дефекты. Также показано, что для получения бездефектной поверхности керамики необходимо не только увеличивать вязкость суспензии, но и уменьшать фракцию обсыпки.

Таким образом, диапазон содержания связующего в суспензии 450–600 мл на 1 кг пылевидного кварца позволяет получить суспензию с вязкостью

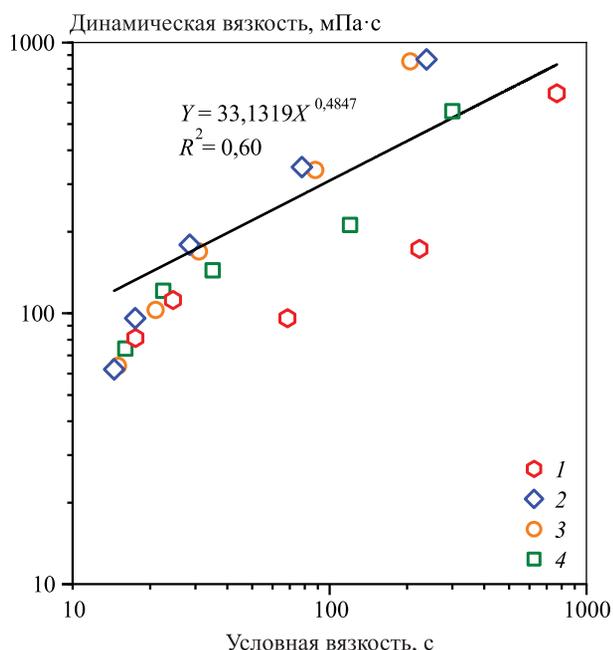


**Рис. 5.** Вязкость суспензии, определенная с помощью ротационного вискозиметра (а) и вискозиметра ВЗ-4 (б), в зависимости от содержания связующего на 1 кг микропорошка

1 – ВТ13-02У, 2 – Ставроформ ВС, 3 – UltraCast One+, 4 – UltraCast Prime

**Fig. 5.** The viscosity of the slurry, determined using the rotational viscosimeter (a) and a VZ-4 viscosimeter (b), depending on the content of the binder per 1 kg of silica powder

1 – VT13-02U, 2 – Stavroform VS, 3 – UltraCast One+, 4 – UltraCast Prime



**Рис. 6.** Соотношение между значениями вязкости суспензии, определенными с помощью вискозиметра ВЗ-4 ( $X$ ) и ротационного вискозиметра ( $Y$ )

1 – ВТ13-02У, 2 – Ставроформ ВС, 3 – UltraCast One+, 4 – UltraCast Prime

**Fig. 6.** Comparison of the viscosity of the slurry, determined using the VZ-4 viscosimeter ( $X$ ) and a rotational viscosimeter ( $Y$ )

1 – VT13-02U, 2 – Stavroform VS, 3 – UltraCast One+, 4 – UltraCast Prime

в указанном выше рекомендуемом диапазоне условной вязкости (20–70 с).

Поскольку в работе определяли как условную вязкость с использованием прибора ВЗ-4, так и динамическую — с помощью ротационного вискозиметра, представляет интерес изучить связь между этими двумя величинами для суспензий, приготовленных на рассмотренных связующих. На рис. 6 представлен график зависимости динамической вязкости (измеряемой в мПа·с) от условной вязкости (в секундах), а также уравнение, позволяющее пересчитать условную вязкость ( $X$ ) в динамическую ( $Y$ ). Уравнение, представленное на рис. 6, может быть упрощено и приведено к следующему виду:

$$Y = 33X^{1/2}.$$

### Результаты испытаний на трехточечный изгиб и определения шероховатости

Результаты определения прочности на изгиб керамических образцов после сушки и прокалики

представлены на рис. 7. Для каждого связующего оценивали влияние вязкости суспензии и фракции плавленного кварца на прочность. В большинстве случаев прочность образцов возрастает с увеличением вязкости суспензии и уменьшением фракции плавленного кварца. Уменьшение фракции плавленного кварца способствует увеличению площади контакта между частицами наполнителя, что, в свою очередь, приводит к повышению прочности.

Что же касается влияния вязкости суспензии, по-видимому, с ее увеличением большее количество связующего остается на предыдущем слое перед обсыпкой. Таким образом, объемная доля связки, представляющей собой затвердевшую суспензию, по отношению к обсыпке в получаемой керамике становится больше. В работе [29] показано, что с повышением вязкости суспензии прочность керамики также растет.

На рис. 8 представлены значения прочности на изгиб керамических образцов, полученных на различных связующих, при вязкости суспензии 40 с и фракции плавленного кварца ПК 0,4–0,6 мм в состояниях после сушки и прокалики. Для образцов, изготовленных на связующих ВТ13-02У, Ставроформ ВС и UltraCast One+, прочность на изгиб после сушки составляет 3,5–4,3 МПа, а после прокалики — 5,8–6,1 МПа, т.е. увеличивается примерно в 1,5 раза, что связано со спеканием керамики. Обычно «сырая» прочность керамики примерно в 2 раза меньше, чем в прокаленном состоянии [17, 18, 25]. Полученные значения очень близки к результатам других работ [10, 17, 24].

Следует учитывать, что прочность в непрокаленном состоянии в значительной степени определяется пропиткой модельной массой мелких дефектов и пор, которая при вытапливании полностью не удаляется [30]. В нашем случае использовался модельный состав ПС 50–50, но при выборе более прочных восков прочность образцов в сыром состоянии может быть выше.

Свойства керамики, полученной на связующем UltraCast Prime, несколько отличаются. В состоянии после сушки и прокалики прочность этих образцов составляет 6,4 и 7,2 МПа соответственно, т.е. она выше как до, так и после прокалики в сравнении с керамиками, полученными на других связующих. В работе [26] использование связующего с добавкой полимера позволило получить высокое значение прочности на изгиб керамики в непрокаленном состоянии, достаточно близкое к таковому прокаленного образца. Таким образом, более высокая прочность керамики, полученной на

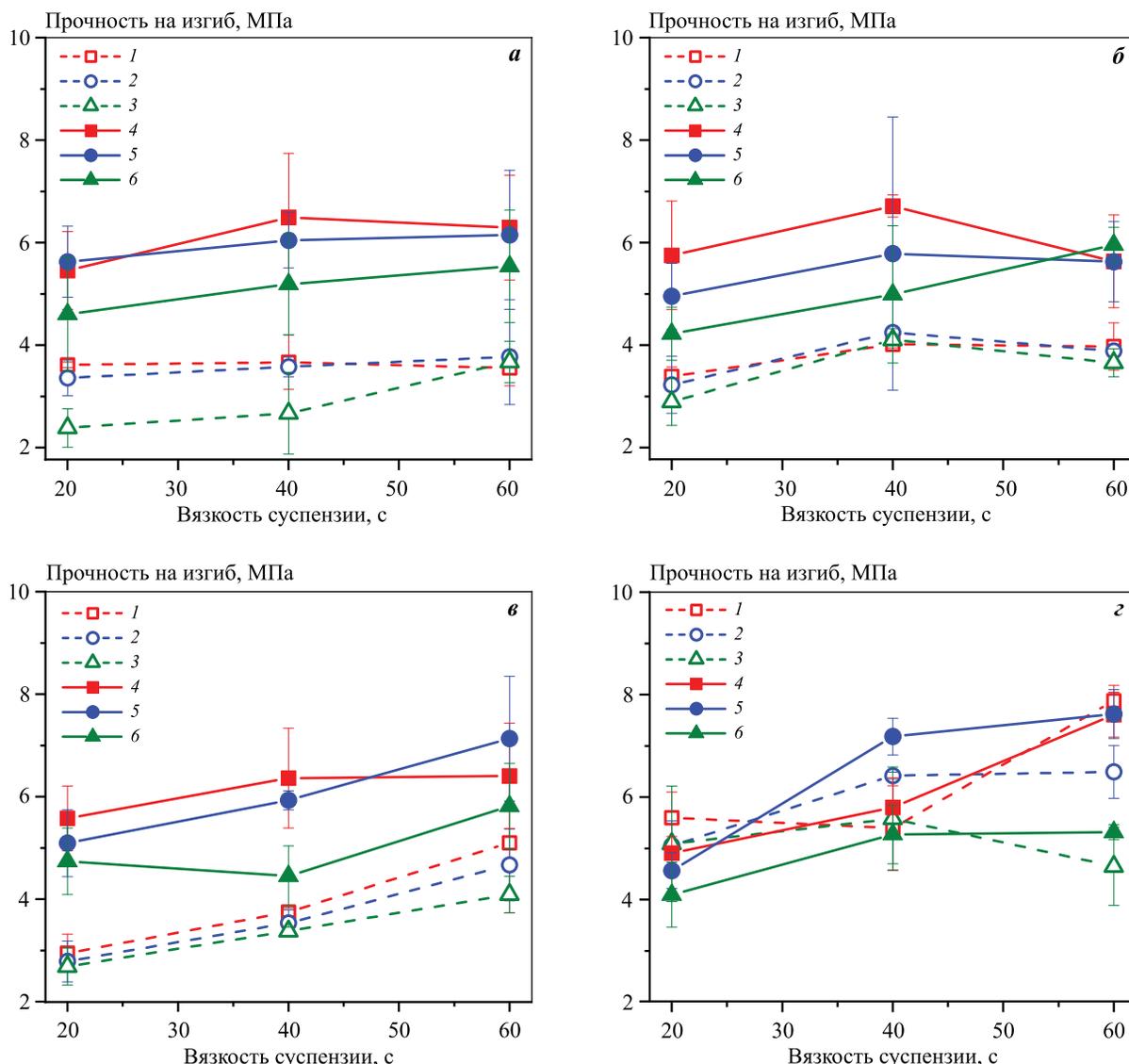


Рис. 7. Прочность на изгиб керамических образцов, полученных на связующих VT13-02У (а), Ставроформ ВС (б), UltraCast One+ (в), UltraCast Prime (з), в состоянии после сушки (1–3) и прокалики (4–6)

Фракция плавленного кварца: ПК 0,25–0,4 мм (1, 4), ПК 0,4–0,6 мм (2, 5), ПК 0,5–1,0 мм (3, 6)

Fig. 7. Flexural strength of ceramic shell specimens obtained with binders: VT13-02U (a), Stavroform VS (б), UltraCast One+ (в), UltraCast Prime (з) as dried (1–3) and after firing (4–6)

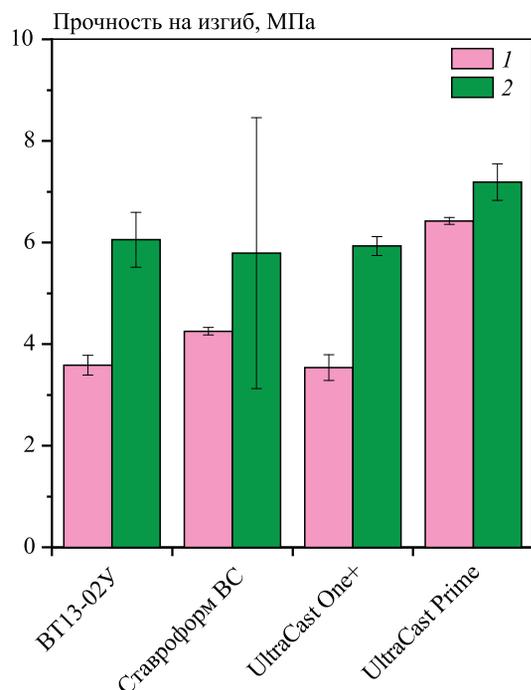
Fused silica fraction: FS 0.25–0.4 mm (1, 4), FS 0.4–0.6 mm (2, 5), FS 0.5–1.0 mm (3, 6)

связующем UltraCast Prime, объясняется наличием полимерной связки, добавляемой как раз для увеличения прочности материала в непрокаленном состоянии.

Наиболее часто применяют керамические формы с прочностью на изгиб от 3–10 МПа [10, 17, 24, 31]. Использование исследуемых связующих материалов позволит обеспечить указанные значения даже в неспеченном состоянии, за исключением вариантов, где суспензия обладает низкой условной вязкостью (~20 с) и ис-

пользуется крупная фракция плавленного кварца (ПК 0,5–1,0 мм).

Для увеличения прочности керамики можно прибегнуть к повышению температуры прокалики форм, так как в этом случае возможно образование кристобалита [14]. Но при этом также происходит увеличение коэффициента термического расширения, что нежелательно [14]. Также можно получить более высокую прочность керамики (от 15 до 40 МПа), если в качестве наполнителя при приготовлении суспензии использовать микропорошок



**Рис. 8.** Прочность на изгиб керамических образцов, полученных на различных связующих, в состояниях после сушки (1) и прокалки (2) при вязкости суспензии 40 с и фракции плавленного кварца ПК 0,4–0,6 мм

**Fig. 8.** The flexural strength of ceramic shell samples obtained with various binders after drying (1) and firing (2) at a slurry viscosity of 40 s and a fused silica fraction FS 0.4–0.6 mm

электрокорунда, а в качестве обсыпки — электрокорунд [9].

Значения шероховатости керамических образцов, полученных на связующих BT13-02U и Ставроформ, составили  $R_z = 25 \pm 2$  и  $26 \pm 3$  мкм соответственно, т.е. с учетом доверительного интервала оба образца имеют одинаковую шероховатость. Керамические образцы на связующих UltraCast Prime и UltraCast One+ показали меньшие значения  $R_z = 15 \pm 1$  и  $21 \pm 2$  мкм соответственно.

Таким образом, свойства современных готовых связующих отечественного производства практически не отличаются от свойств аналогичных связующих на основе гидролизованного раствора этилсиликата, но в отличие от последних они пожаробезопасны и более экологичны [5, 7–9, 12]. Это позволяет их использовать в производстве огнеупорных оболочек для получения отливок на автоматизированных и роботизированных линиях нанесения огнеупорной оболочки, после коррекции технологических параметров, которые подбираются для каждого связующего отдельно.

## Выводы

Исследована вязкость суспензий, приготовленных на водных связующих (BT13-02U, Ставроформ ВС, UltraCast One+ и UltraCast Prime) и пылевидном плавленном кварце, а также прочность на изгиб керамических образцов, полученных с использованием этих суспензий, и обсыпки из плавленного кварца. Были получены следующие результаты.

1. По своим реологическим свойствам рассмотренные суспензии близки к ньютоновским жидкостям и имеют близкие значения вязкости. При содержании связующего 400 и 600 мл на 1 кг пылевидного кварца динамическая вязкость в среднем составляет  $\sim 732$  и  $\sim 70$  мПа·с соответственно.

2. Увеличение объема связующего с 400 до 600 мл на 1 кг пылевидного кварца приводит к снижению условной вязкости с  $\sim 380$  до  $\sim 16$  с соответственно, т.е. примерно в 24 раза. Значения условной ( $X$ ) и динамической ( $Y$ ) вязкости связаны между собой и могут быть описаны уравнением  $Y = 33X^{1/2}$ .

3. Для образцов, полученных на связующих BT13-02U, Ставроформ ВС и UltraCast One+, значения прочности на изгиб очень близки и составляют 3,5–4,3 МПа после сушки и 5,8–6,1 МПа после прокалки. При использовании связующего UltraCast Prime прочность на изгиб после сушки и прокалки составляет 6,4 и 7,2 МПа соответственно. Высокая «сырая» прочность в этом случае может быть связана с наличием в связующем полимерных добавок.

4. Прочность образцов возрастает с увеличением вязкости суспензии и уменьшением фракции плавленного кварца как после сушки, так и в прокаленном состоянии.

5. Значения шероховатости керамических образцов, полученных на связующих BT13-02U и Ставроформ, составили  $R_z = 25 \pm 2$  и  $26 \pm 3$  мкм. Керамические образцы, изготовленные с использованием связующих UltraCast Prime и UltraCast One+, имели меньшие значения шероховатости:  $15 \pm 1$  и  $21 \pm 2$  мкм соответственно.

## Список литературы/References

1. Kanyo J.E., Schaffner 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>
2. Новокрещенных Е.Н., Мырзина К.М., Ордин Д.А., Вахрушев В.В., Дьяков М.С., Пойлов В.З., Углев Н.П.

- Исследование и выбор реагентов при разработке составов водно-коллоидных связующих для литейных керамик. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;(10):14–18.
- Novokreshchennykh E.N., Myrzina K.M., Ordin D.A., Vakhrushev V.V., D'yakov M.S., Poilov V.Z., Uglev N.P. Research and selection of reagents in the development of compositions of colloidal silica binders for investment casting ceramics. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2017;(10):14–18. (In Russ.).
3. Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process — A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212:2332–2348. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
  4. Базылев В.А., Черномас В.В. Применение связующего «Амосил®» для изготовления оболочковых форм в литье по выжигаемым моделям. В сб: *Материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов* (г. Комсомольск-на-Амуре, 1–15 апр. 2016 г.). Комсомольск на Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2016. С. 47–49.
  5. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Овчинников М.В., Пинаев А.С. Применение универсальных кремнеземных связующих на водной основе для изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям. *Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки*. 2019;(18):149–154.  
Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Ovchinnikov M.V., Pinaev A.S. The use of universal water-based colloidal silica binders for the manufacture of ceramic investment casting molds. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki*. 2019;(18):149–154. (In Russ.).
  6. Деменок А.О., Ганеев А.А., Деменок О.Б., Бакерин С.В., Кулаков Б.А. Разработка ресурсосберегающей технологии получения крупногабаритных отливок из титановых сплавов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2015;15(2):20–25.  
Demenok A.O., Ganeev A.A., Demenok O.B., Bakerin S.V., Kulakov B.A. Development of resource-saving technology for production of large-size castings from titanium alloys. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015;15(2):20–25. (In Russ.).
  7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Овчинникова М.В. Технология формообразования с применением связующих на водной основе в литье по выплавляемым моделям. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2020;11(1):29–31.  
Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Ovchinnikova M.V. Technology of molding with the use of colloidal silica binders in investment casting. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2020;11(1):29–31. (In Russ.).
  8. Шутова О.О., Леушина Л.И. Повышение экологической безопасности технологии точного алюминиевого литья на предприятии авиастроения. В сб: *Металлургия XXI столетия глазами молодых: Сборник докладов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов* (22 мая 2019 г.). Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2019. С. 342–344.
  9. Мухамадеев И.Р., Деменок О.Б., Ганеев А.А., Павлин С.П., Аликин П.В. Выбор связующих на водной основе для оболочковых форм литья по выплавляемым моделям титановых сплавов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2015;15(3):95–104.  
Mukhamadeev I.R., Demenok O.B., Ganeev A.A., Pavlinich S.P., Alikin P.V. Selection of water-based colloidal silica binders for shell molds of titanium alloys investment casting. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015;15(3):95–104. (In Russ.).
  10. Ворфоломеев М.С. Особенности изготовления корундовых керамических форм по выплавляемым моделям на основе неорганического водного связующего. *Литейное производство*. 2021;(11):16–18.  
Vorfolomeev M.S. Features of the production of corundum ceramic molds for investment casting based on an inorganic aqueous colloidal silica binder. *Liteinoe proizvodstvo*. 2021;(11):16–18. (In Russ.).
  11. Козлов В.В., Варфоломеев М.С. Особенности технологии изготовления корундовых литейных форм на основе зольных связующих в литье по выплавляемым моделям. *Литейщик России*. 2020;(10):32–35.  
Kozlov V.V., Varfolomeev M.S. Features of Manufacturing Technology of Corundum Casting Molds Based on Colloidal silica Binders in Investment Casting. *Liteishchik Rossii*. 2020;(10):32–35. (In Russ.).
  12. Ордин Д.А., Новокрещенных Е.Н., Пойлов В.З., Углев Н.П. Перевод технологии литья по выплавляемым моделям в авиастроении на керамику, полученную с использованием связующих на водной основе: Обзор выполненных исследований. *Вестник ПНИПУ*. 2016;(3):59–74.  
Ordin D.A., Novokreshchennykh E.N., Poilov V.Z., Uglev N.P. Transfer of investment casting technology in aircraft construction to ceramics produced with colloidal silica binders: Review of the studies carried out. *Vestnik PNIPU*. 2016;(3):59–74. (In Russ.).
  13. Чернов В.П., Селиванова Е.А. Исследование свойств огнеупорных суспензий, используемых для керамики

- ческих форм при литье по выплавляемым моделям. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2010;(3):21–25.
- Chernov V.P., Selivanova E.A. Investigation of the properties of slurries used for investment casting ceramic molds. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2010;(3):21–25. (In Russ.).
14. Kanyo J.E., Schaffner 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;40:4955–4973. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013>
  15. Дьячков В.Н., Парамонов А.М., Никитин К.В. Совершенствование технологии получения отливок способом ЛВМ. *Литейщик России*. 2012;(5):32–33. D'yachkov V.N., Paramonov A.M., Nikitin K.V. Improving the technology for producing castings by the investment casting method. *Liteishchik Rossii*. 2012;(5):32–33. (In Russ.).
  16. Дубровин В.К., Кулаков Б.А., Карпинский А.В., Гойхенберг Ю.Н. Выбор формовочных материалов для литья по разовым моделям. *Литейщик России*. 2015;(7):12–15. Dubrovin V.K., Kulakov B.A., Karpinskii A.V., Goikhenberg Yu.N. Selection of molding materials for investment casting. *Liteishchik Rossii*. 2015;(7):12–15. (In Russ.).
  17. Петров А.Ю., Трубкина С.Н., Гилев В.И., Вертюх С.С., Овчинников М.В. Универсальные кремнезольные связующие материалы на водной основе. *Литейщик России*. 2018;(6):9–13. Petrov A.Yu., Trubkina S.N., Gilev V.I., Vertyukh S.S., Ovchinnikov M.V. Universal water based colloidal silica binders. *Liteishchik Rossii*. 2018;(6):9–13. (In Russ.).
  18. Юсипов Р.Ф., Демьянов Е.Д., Виноградов В.Ю., Паремский И.Я., Айрапетян А.С. Метод оценки качества поверхности лицевого слоя формы литья по выплавляемым моделям. *Литейное производство*. 2021;(8):23–26. Yusipov R.F., Dem'yanov E.D., Vinogradov V.Yu., Paremskii I.Ya., Airapetyan A.S. Method for evaluating the surface quality of the facecoat layer of an investment casting mold. *Liteinoe proizvodstvo*. 2021;(8):23–26. (In Russ.).
  19. Ferenc-Dominik J., Matysiak H., Kurzydowski K.J. Organic viscosity modifiers for controlling rheology of ceramic slurries used in the investment casting. *Advances in Science and Technology*. 2010;70:102–107. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.70.102>
  20. Kolczyk J., Zych J. Rheological properties of ceramic slurries with colloidal binders used in the investment casting technology. *Metalurgija*. 2013;52:55–58.
  21. Jones S., Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;135:258–265. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00907-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00907-X)
  22. Jones S., Jolly M.R., Lewis K. Development of techniques for predicting ceramic shell properties for investment casting. *British Ceramic Transactions*. 2002;101:106–113. <https://doi.org/10.1179/096797802225003316>
  23. AMETEK Brookfield. LV Standard Spindles. URL: [https://store.brookfieldengineering.com/lv-standard-spindles/?\\_pos=1&\\_sid=d76593138&\\_ss=r](https://store.brookfieldengineering.com/lv-standard-spindles/?_pos=1&_sid=d76593138&_ss=r) (accessed: 02.12.2022).
  24. Li K., Liu X.-D., Du Z.-X., Li Y.-F. Bending strength and fracture surface topography of natural fiber-reinforced shell for investment casting process. *China Foundry*. 2016;13:211–216. <https://doi.org/10.1007/s41230-016-5100-4>
  25. Zhao E., Kong F., Chen Y., Chen R., Chen Y. Characterization of zirconia-based slurries with different binders for titanium investment casting. *China Foundry*. 2012;9:125–130.
  26. Venkat Y., Choudary K.R., Das D.K., Pandey A.K., Singh S. Ceramic shell moulds with zircon filler and colloidal silica binder for investment casting of shrouded low-pressure turbine blades. *Ceramics International*. 2020;46:26572–26580. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.125>
  27. Vyas A.V., Pandya M.P., Sutaria M.P. Effect of mixing proportion and mixing time on primary slurry retention and surface roughness of investment casting shells. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;872:012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012094>
  28. Bundy J., Viswanathan S. Characterization of zirconia-based slurries with different binders for titanium investment casting. *International Journal of Metalcasting*. 2008;3:27–37. <https://doi.org/10.1007/BF03355439>
  29. Kline D.M. Controlling strength and permeability of silica investment casting molds: Masters Theses. Missouri: Missouri University of Science and Technology, 2010.
  30. Lee K., Blackburn S., Welch S.T. A more representative mechanical testing of green state investment casting shell. *Ceramics International*. 2017;43:268–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.149>
  31. Ivanov V.I., Kazennov S.A., Kurchman B.S. et al. Investment casting (Ed. by Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov). Moscow: Mashinostroenie, 1984. (In Russ.).

## Информация об авторах

**Вячеслав Евгеньевич Баженов** – к.т.н., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ), Национальный исследовательский технологический университет «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

**Андрей Владимирович Санников** – к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-0517-7732>

E-mail: a.v.sannikov@inbox.ru

**Андрей Вадимович Колтыгин** – к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-8376-0480>

E-mail: misistlp@mail.ru

**Денис Васильевич Тен** – инженер научного проекта лаборатории «Гибридные наноструктурные материалы», НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0003-2513-4462>

E-mail: teden92@yandex.ru

**Андрей Андреевич Рижский** – учебный мастер кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-6679-7126>

E-mail: andrew89.r.a@gmail.com

**Владимир Дмитриевич Белов** – д.т.н., зав. кафедрой ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

**Евгений Алексеевич Лазарев** – главный металлург, ПАО ОДК «Кузнецов».

E-mail: ea.lazarev@uec-kuznetsov.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

**Andrey V. Sannikov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-0517-7732>

E-mail: a.v.sannikov@inbox.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.com

**Denis V. Ten** – R & D engineer, Laboratory “Hybrid Nanostructured Materials”, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0003-2513-4462>

E-mail: teden92@yandex.ru

**Andrey A. Rizhsky** – Laborat. Assistant, Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-6679-7126>

E-mail: andrew89.r.a@gmail.com

**Vladimir D. Belov** – Doc. Sci. (Eng.), Head of Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

**Evgeniy A. Lazarev** – Head Metallurgist, Public Joint Stock Company UEC “Kuznetsov”.

E-mail: ea.lazarev@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.В. Санников** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

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

**Д.В. Тен** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

**А.В. Рижский** – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

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

**Е.А. Лазарев** – формулировка цели и задачи исследования, обеспечение ресурсами.

## Contribution of the authors

**V.E. Bazhenov** – conceptualization, analysis of the experimental results, writing of the manuscript.

**E.P. Kovyshkina** – realization of experiment, analysis of the experimental results.

**A.V. Sannikov** – realization of experiment, analysis of the experimental results.

**A.V. Koltygin** – scientific guidance, review and editing of the manuscript.

**D.V. Ten** – realization of experiment, analysis of the experimental results.

**A.A. Rizhsky** – realization of experiment, analysis of the experimental results.

**V.D. Belov** – supervision, review and editing of the manuscript.

**E.A. Lazarev** – formulation of the aims and objectives of the study, provision of resources.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023, доработана 10.03.2023, подписана в печать 13.03.2023

The article was submitted 09.01.2023, revised 10.03.2023, accepted for publication 13.03.2023