

УДК 676.085.4

**Н. Р. Прокопчук, А. Ю. Ключев, И. О. Лаптик**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОГО СОСТАВА НАНОАЛМАЗНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Рассмотрен модифицированный наноалмазными частицами модельный состав ЗГВ-1 производства ОАО «Завод горного воска» (г. п. Свислочь, Беларусь) для точного литья по выплавляемым моделям изделий из черных и цветных металлов. Разработана лабораторная технология введения в модельный состав ЗГВ-1 наноалмазных частиц производства НПЗАО «Синта» (г. Минск, Беларусь) – алмазосодержащей шихты марки АШ-А и ультрадисперсного синтетического алмаза марки УДА. Оценена совместимость наночастиц с модельным составом в зависимости от способа введения. Получены модельные составы с разными концентрациями наночастиц (мас. %): 0,005; 0,010; 0,050; 0,10. Определена теплостойкость модифицированных модельных составов по двум независимым параметрам: температуре размягчения ( $T_p$ ) и температуре каплепадения по Уббеллоде ( $T_{уб}$ ). Установлены зависимости  $T_p$  и  $T_{уб}$  от концентрации наночастиц, объяснен их характер: быстрый рост теплостойкости модельных составов при начальных концентрациях (0,005 мас. %) и последующее снижение  $T_p$  и  $T_{уб}$  с дальнейшим ростом концентрации наночастиц. Предложен механизм повышения теплостойкости модельного состава ЗГВ-1 наноалмазными частицами, заключающийся в следующем: в результате взаимодействия энергетически активной поверхности наночастиц с карбоксильными и гидроксильными группами компонентов, входящих в состав модельного состава ЗГВ-1, формируется система взаимопроникающих сеток физической природы, исчезающая в основном при плавлении и вновь восстанавливающаяся при затвердении модельных составов.

Этот обратимый процесс можно осуществлять многократно. Повышение теплостойкости модельного состава ЗГВ-1 более чем на 10°C имеет важное практическое значение.

**Ключевые слова:** модельный состав, точное литье, выплавляемые модели, изделия из металлов, наноалмазные частицы, температура размягчения, температура каплепадения по Уббеллоде.

**Для цитирования:** Прокопчук Н. Р., Ключев А. Ю., Лаптик И. О. Повышение теплостойкости модельного состава наноалмазными частицами // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 96–100.

**N. R. Prokopchuk, A. Yu. Klyuev, I. O. Laptik**  
Belarusian State Technological University

### **INCREASING THE HEAT RESISTANCE OF THE MODEL COMPOSITION BY NANODIAMOND PARTICLES**

The model composition ZGV-1 produced by OJSC “Mining Wax Plant” (town of Svisloch, Belrus) has been modified with nanodiamond particles for precision investment casting of items made of ferrous and non-ferrous metals. A laboratory technology has been developed for introducing nanodiamond particles produced by Refinery “Sinta” (Minsk, Belarus) into the model composition ZGV-1 a diamond-containing charge of the ASh-A grade and ultradispersed synthetic diamond of the UDA grade. The compatibility of nanoparticles with the model composition was evaluated depending on the method of administration. Model compositions were obtained with different concentrations of nanoparticles (wt. %): 0.005; 0.010; 0.050; 0.10. The heat resistance of the modified model compositions was determined by two independent parameters: the softening temperature ( $T_f$ ) and the Ubbelode dropping point ( $T_{UB}$ ). The dependences of  $T_f$  and  $T_{UB}$  on the concentration of nanoparticles were established, their nature was explained: a rapid increase in the heat resistance of model compositions at initial concentrations (0.005 wt. %) and a subsequent decrease in  $T_f$  and  $T_{UB}$  with a further increase in the concentration of nanoparticles. A mechanism is proposed for increasing the heat resistance of the model composition ZGV-1 with nanodiamond particles, which consists in the following: as a result of the interaction of the energetically active surface of nanoparticles with the carboxyl and hydroxyl groups of the components that make up the model composition of ZGV-1, a system of interpenetrating nets of physical nature is formed, which disappears mainly when melting and re-recovering upon solidification of the model compositions.

This reversible process can be repeated many times. An increase in the heat resistance of the model composition ZGV-1 by an average of 10°C is of great practical importance.

**Key words:** model composition, precision casting, lost wax models, metal products, nanodiamond particles, softening temperature, dropping point according to Ubbellode.

**For citation:** Prokopchuk N. R., Klyuev A. Yu., Laptik I. O. Increasing the heat resistance of the model composition by nanodiamond particles. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 96–100 (In Russian).

**Введение.** Возрастающие требования к продукции машиностроения стимулируют разработки новых высокоэффективных способов обработки металлов. Метод литья по выплавляемым моделям, благодаря преимуществу по сравнению с другими способами изготовления отливок, получил значительное распространение. Он позволяет максимально приблизить отливки к готовой детали, а иногда получить литьевую деталь без дополнительной обработки перед сборкой.

В настоящее время на рынке стран ЕАЭС присутствуют достаточно эффективные модельные составы, производимые фирмами США, Германии, России, и модельные составы, производимые белорусским ОАО «Завод горного воска». Базовым вариантом нескольких типов модельных составов, выпускаемых этим предприятием, является ЗГВ-1, применяемый на ряде предприятий России и Беларуси [1]. Он уступает зарубежным аналогам по теплостойкости, но отличается от них меньшей стоимостью из-за использования в его составе доступных, недорогих компонентов (мас. %) [2]: буроугольный воск Камонта (30,0) [3]; парафин (45,0) [4]; полиэтиленовый воск ПВ-200 (10,0) [5]; сосновая живичная канифоль (10,0) [6]; триэтанолламин (5,0). Модельный состав ЗГВ-1 применяется для получения отливок из многих литейных сплавов.

Теплостойкость – способность материала не размягчаться при его нагревании до определенной температуры.

Высокая теплостойкость модельных составов особенно важна при производстве сверхточных деталей больших геометрических размеров во избежание потери формы модели, особенно при повышенных температурах воздуха в цеху в летний период времени.

**Основная часть.** Целью исследования является создание модельного состава для точного литья повышенной теплостойкости путем связывания компонентов дополнительными физическими взаимодействиями, создаваемыми наноалмазными частицами (ультрадисперсный алмаз сухой порошок (УДА-СП), ультрадисперсный алмаз в толуоле (УДА Т), ультрадисперсный алмаз в бутилацетате (УДА БА), ультрадисперсный алмаз водный концентрат (УДА ВК), алмазосодержащая шихта (АШ-А)); с учетом потенциальных возможностей наночастиц с высокой некомпенсированной поверхностной

энергией усиление физических взаимодействий в модельном составе и повышение на основе этого его теплостойкости.

Объектами исследования служили: модельный состав ЗГВ-1, наноалмазные частицы производства НПЗАО «Синта» (г. Минск, Беларусь) – алмазосодержащая шихта марки АШ-А (ТУ РБ 100056180.003–2003) и ультрадисперсный синтетический алмаз марки УДА (ТУ РБ 28619110.001–95). Характеристика углеродных наноматериалов приведена в статье [7].

Температура размягчения модельных составов немодифицированного ЗГВ-1 и содержащих разные концентрации АШ-А и УДА определяли по ГОСТ 23863–79 на аппарате типа ИКАР [8]. За температуру размягчения принимали среднее арифметическое четырех показаний термометра для каждого образца. Расхождения между наиболее отличающимися показаниями термометра не превышали 0,8°C.

Температурой каплепадения называют температуру, при которой капля олигомера отделяется от равномерно нагретой массы испытуемого вещества под действием собственного веса. Температура каплепадения определяется на приборе Уббеллоде [9].

Модельный состав, содержащий наночастицы, получали путем введения в него расчетного количества (мас. %) 0,005; 0,01; 0,05; 0,1 УДА-СП, УДА Т, УДА БА, УДА ВК, АШ-А порциями, предварительно перемешивая нагретую массу ЗГВ-1 до жидкого состояния на мешалке типа ИКА RW 20 digital со скоростью 220 об./мин в течение 30 мин [10].

На рис. 1 и 2 представлены графические экспериментальные данные по влиянию концентрации наноалмазных частиц, введенных в модельный состав ЗГВ-1, на температуру размягчения и температуру каплепадения по Уббеллоде модифицированного композиционного состава ЗГВ-1.

На рисунках показано, что зависимости температур размягчения и каплепадения по Уббеллоде от концентрации наноалмазных частиц по своему характеру схожи. Вначале при малых концентрациях АШ-А (0,005 мас. %) наблюдается резкий рост температур. Затем этот рост прекращается и при содержании наночастиц 0,02 мас. % отмечается снижение теплостойкости (температуры размягчения). При больших концентрациях 0,05 и 0,1 мас. % происходит дальнейшее снижение теплостойкости наномодифицированного модельного состава ЗГВ-1.

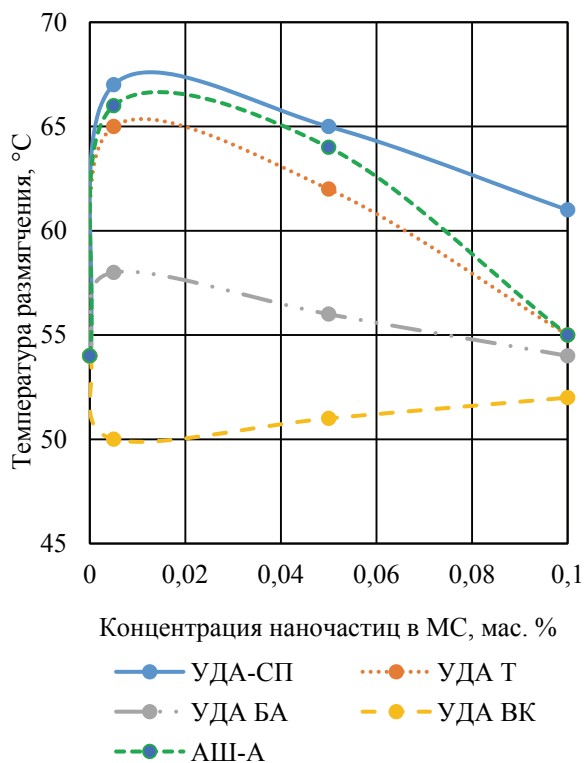


Рис. 1. Зависимость температуры размягчения от концентрации наночастиц

Таким образом, оптимальной концентрацией наноалмазных частиц АШ-А в ЗГВ-1 является концентрация 0,01 мас. %. Экспериментальный характер зависимостей на рис. 1 и 2 можно объяснить следующим образом. В области концентраций наночастиц 0,001–0,005 мас. % формируется пространственная физическая сетка в результате взаимодействия энергетически активной поверхности наночастиц с карбоксильными и гидроксильными группами компонентов, входящих в состав модельного состава ЗГВ-1. При концентрации наночастиц 0,01 мас. % эта сетка наиболее однородная и плотная. При дальнейшем увеличении содержания наночастиц в композиции в начале нарушается однородность физической сетки, а затем и ее плотность из-за сближения наночастиц и их агрегации.

Для модификации ЗГВ-1 частицами УДА эти закономерности в основном сохраняются. Исключение составляет ведение наномодификатора УДА ВК: значение  $T_r$  и  $T_{уб}$  ниже, чем у немодифицированного образца, что можно объяснить несовместимостью УДА ВК с компонентами модельного состава ЗГВ-1. Эффект повышения теплостойкости модификатором УДА БА при его малых концентрациях 0,005 мас. % составляет всего 2–3°C. Таким образом, наиболее эффективны в повышении теплостойкости мо-

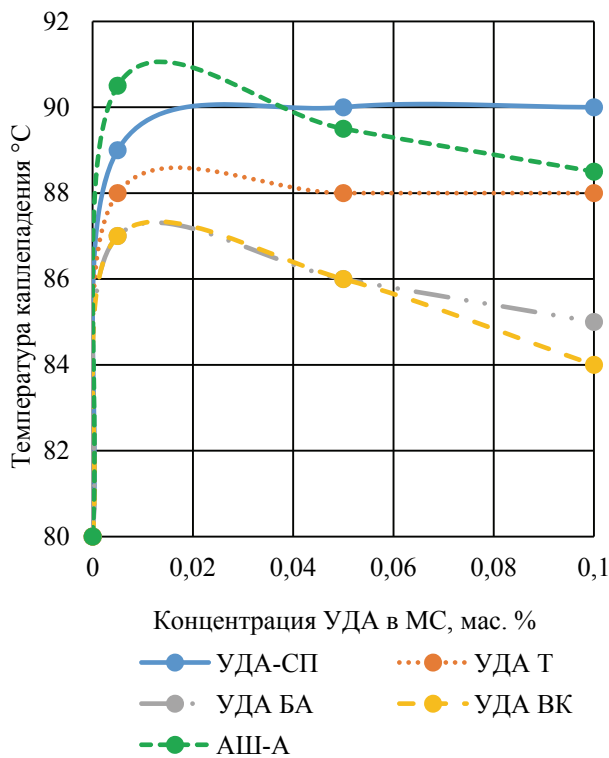


Рис. 2. Зависимость температуры каплепадения по Уббеллоде от концентрации наночастиц

дельного состава ЗГВ-1 наночастицы АШ-А и УДА СП.

Достигнутое повышение теплостойкости модельного состава ЗГВ-1 при очень малых концентрациях наноалмазных частиц имеет практическое значение: температура размягчения повышается на 12–13°C, а температура каплепадения по Уббеллоде возрастает на 9–10°C.

**Закключение.** Теплостойкость модельного состава ЗГВ-1 повышена более чем на 10°C за счет введения в него 0,01 мас. % наноалмазных частиц АШ-А и УДА СП. Предложен механизм повышения теплостойкости состава ЗГВ-1: наноалмазные частицы с большой нескомпенсированной поверхностной энергией взаимодействуют друг с другом, образуя цепочечные и далее сетчатые структуры; компоненты модельного состава, взаимодействуя по полярным карбоксильным и гидроксильным группам, также образуют физическую сетку, удерживающую компоненты в композиции; две физические сетки пронизывают друг друга, образуя таким образом систему взаимопроникающих сеток. При нагревании модельного состава до температуры размягчения физические связи в основном разрушаются, а при его охлаждении связи восстанавливаются, композиция затвердевает. Этот обратимый процесс

можно осуществить несколько раз без потери теплостойкости модельного состава. Поэтому его можно использовать повторно для получения литых деталей, что повышает конкурентоспособность состава ЗГВ-1.

Исследования выполнялись в рамках задания ГБ 21-171 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы».

### Список литературы

1. Ключев А. Ю., Прокопчук Н. Р. Новые направления переработки и использования сосновой живицы. Минск: БГТУ, 2020. 412 с.
2. Модельный состав для точного литья и способ его получения: пат. ВУ 18054 / А. Ю. Ключев, Р. В. Титенкова, Н. Г. Козлов, В. В. Мулярчик, Н. Р. Прокопчук, И. А. Латышев, В. Н. Данишевский, В. Г. Константинов. Опубл. 28.02.2014.
3. Буроугольный битум и воск // Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://chem21.info/1569773> (дата обращения: 03.03.2021).
4. Парафины нефтяные твердые. Технические условия: ГОСТ 23683–89. М.: Изд-во стандартов, 1989. 14 с.
5. Воск полиэтиленовый ПВ-200 // Большая энциклопедия нефти и газа. URL: <https://www.ngpedia.ru/id586163p1> (дата обращения: 04.04.2020).
6. *Канифоль сосновая. Технические условия*: ГОСТ 19113–84. М.: Изд-во стандартов, 1984. 8 с.
7. Улучшение свойств покрытий по металлу нанодIAMЗными частицами / Н. Р. Прокопчук [и др.] // Цветные металлы. 2021. № 6. С. 55–58.
8. Продукты лесохимические. Методы определения температуры размягчения: ГОСТ 23863–79. М.: Изд-во стандартов, 1979. 10 с.
9. Определение температуры каплепадения по Уббеллоде. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <https://chem21.info/122537> (дата обращения: 12.02.2021).
10. Модификация нанодIAMЗными частицами модельного состава для точного литья по выплавляемым моделям / Н. Р. Прокопчук [и др.] // Нанозифика и наноматериалы: сб. науч. тр. междунар. симпозиума Санкт-Петербург, 24–25 нояб. 2021 г. СПб., 2021. С. 234–239.

### References

1. Klyuev A. Yu., Prokopchuk N. R. *Novyye napravleniya pererabotki i ispol'zovaniya sosnovoy zhivitsy* [New directions of processing and use of pine resin]. Minsk, BSTU Publ., 2020. 412 p. (In Russian).
2. Klyuev A. Yu., Titenkova R. V., Kozlov N. G., Mulyarchik V. V., Prokopchuk N. R., Latshevich I. A., Danishevskiy V. N., Konstantinov V. G. Model composition for precision casting and a method for its production. Patent BY 18054, 2014 (In Russian).
3. Brown coal bitumen and wax. Available at: <https://chem21.info/1569773> (accessed 03.03.2021) (In Russian).
4. GOST 23683–89. Petroleum paraffins, solid. Technical conditions. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. 14 p. (In Russian).
5. Polyethylene wax PV-200. Available at: <https://www.ngpedia.ru/id586163p1> (accessed 04.04.2020) (In Russian).
6. GOST 19113–84. Rosin pine. Technical conditions. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1984. 8 p. (In Russian).
7. Prokopchuk N. R., Globa N. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. Improving the properties of coatings on metal with nanodiamond particles. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2021, no. 6, pp. 55–58 (In Russian).
8. GOST 23863–79. Wood chemical products. Methods for determining the softening point. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979. 10 p. (In Russian).
9. Determination of the drop-off temperature by Ubbelode. Available at: <https://chem21.info/122537> (accessed 12.02.2021) (In Russian).
10. Prokopchuk N. R., Syrkov A. G., Klyuev A. Yu., Laptik I. O. Modification of model composition with nanodiamond particles for precision investment casting. *Nanofizika i nanomaterialy: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnogo simpoziuma* [Nanophysics and nanomaterials: collection of Scientific papers of the International Symposium]. St. Petersburg, 2021. P. 234–239 (In Russian).

### Информация об авторах

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский

государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tnsippm@belstu.by

**Клюев Андрей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irka-ideal@rambler.ru

**Лаптик Инна Олеговна** – инженер кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: inna.laptik@yandex.ru

#### **Information about the authors**

**Prokopchuk Nicolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tnsippm@belstu.by

**Klyuev Andrey Yurievich** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irka-ideal@rambler.ru

**Laptik Inna Olegovna** – engineer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: inna.laptik@yandex.ru

*Поступила 15.11.2022*