

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.03

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-21-33>

Исследование структуры и свойств стали Г13 с модифицирующими и органическими добавками

Ж. В. Еремеева^{1,2}, Ю. С. Тер-Ваганянц² ✉

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Российская Федерация

² Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: juliatv1990@mail.ru

Резюме

Цель исследования – определить влияние модифицирующих и органических добавок на структуру и свойства порошковой стали Г13.

Методы. Проводилось исследование микроструктуры и механических свойств стали Г13 с модифицирующими и органическими добавками. В качестве модифицирующих добавок использовались: порошок наноксида алюминия и порошок наноксида циркония. В качестве органических добавок использовались: этиленбис-стеаромид, стеарат никеля, стеарат меди, стеарат марганца, стеарат железа. Исследование микроструктуры проводилось на электронном микроскопе марки S-3400N. Твердость определяли по глубине отпечатка методом Роквелла. В качестве индентора был взят стальной закаленный шарик диаметром 1,56 мм. Испытания на изгиб проводили на электрогидравлической разрывной машине HUS-2010z системы MFL в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера IBM PX.

Результаты. При исследовании микроструктуры стали Г13 установлено, что наиболее мелкозернистая структура аустенита наблюдается у стали, имеющей следующий состав исходной шихты: Fe + 14,5%FeMn + 1,2%C + ZrO₂(нано). Равномерная структура аустенита с мелкими округлыми порами наблюдается у стали Г13, имеющей следующие составы исходной шихты: Fe + 13%FeMn + 1,3%C + 1%См.Си; Fe + 14,5%FeMn + 1,2%C + 0,5%См.Мп (теплое смешивание). Исследование механических характеристик показало, что наилучшим сочетанием твердости после спекания и прочности на изгиб обладают заготовки из порошковой смеси состава Fe + 14,5%FeMn + 1,2%C + 0,5% См. Ni.

Заключение. Наиболее положительное влияние на структуру порошковой стали Г13 оказали модифицирующая добавка порошка наноксида циркония, а также органические добавки стеарата меди и стеарата марганца. Наилучшим сочетанием механических характеристик (твердости и прочности на изгиб) обладают заготовки, в которые вводилась органическая добавка стеарата никеля.

Ключевые слова: порошковые стали; модифицирующие добавки; органические добавки; твердость; микроструктура; прочность на изгиб.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Еремеева Ж. В., Тер-Ваганянц Ю. С. Исследование структуры и свойств стали Г13 с модифицирующими и органическими добавками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 21–33. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-21-33>.

Поступила в редакцию 06.06.2023

Подписана в печать 16.07.2023

Опубликована 29.09.2023

© Еремеева Ж. В., Тер-Ваганянц Ю. С., 2023

Study of the Structure and Properties of Steel G13 with Modifying and Organic Additives

Zhanna V. Ereemeeva^{1,2}, Yuliya S. Ter-Vaganyants²

¹ National Research Technological University MISiS
4 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: juliatv1990@mail.ru

Abstract

The purpose of the study – is to determine the effect of modifying and organic additives on the structure and properties of G13 powder steel.

Methods. The study of the microstructure and mechanical properties of G13 sludge with modifying and organic additives was carried out. As modifying additives were used: nano-aluminum oxide powder and nano-zirconium oxide powder. The following organic additives were used: ethylene-bis-stearamide, nickel stearate, copper stearate, manganese stearate, iron stearate. The microstructure was studied using an S-3400N electron microscope. Hardness was determined by the depth of the indentation by the Rockwell method. A hardened steel ball with a diameter of 1.56 mm was taken as an indenter. Bending tests were carried out on an MFL HUS-2010z electro-hydraulic tensile testing machine in automatic mode using an IBM PX personal computer.

Results. When studying the microstructure of steel G13, it was found that the most fine-grained austenite structure is observed in steel with the following composition of the initial charge: Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + ZrO₂ (nano). A uniform structure of austenite with small rounded pores is observed in steel G13, which has the following compositions of the initial charge: Fe + 13% FeMn + 1.3% C + 1% St.Cu; Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St.Mn (warm mix). The study of mechanical characteristics has shown that the best combination of hardness after sintering and bending strength is possessed by workpieces made from a powder mixture of composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Ni.

Conclusion. The most positive effect on the structure of G13 powder steel was exerted by the modifying additive of nano-zirconium oxide powder, as well as organic additives of copper stearate and manganese stearate. The best combination of mechanical characteristics (hardness and bending strength) is exhibited by billets into which an organic additive of nickel stearate was introduced.

Keywords: powder steels; modifying additives; organic additives; hardness; microstructure; bending strength.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ereemeeva Z. V., Ter-Vaganyants Y. S. Study of the Structure and Properties of Steel G13 with Modifying and Organic Additives. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 21–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-21-33>

Received 06.06.2023

Accepted 16.07.2023

Published 29.09.2023

Введение

Высокомарганцовистые аустенитные стали, известные как стали Гадфильда, были представлены сэром Робертом Хэдфилдом [1; 2]. Они обладают хорошей прочностью, ударной вязкостью и ударопрочностью. Несмотря на то, что они долгое время использовались в нескольких

отраслях промышленности, точное происхождение этих свойств все еще остается сложным и зависит от нескольких факторов, таких как химический состав, рабочая температура и приложенное напряжение. Тем не менее основные объяснения высокой стойкости к механическому упрочнению связывают со скольжением дислока-

ций, динамическим старением при деформации, ε - или α -мартенситного превращения и двойникования [3–10].

Износостойкость и устойчивость к высоким статическим и динамическим нагрузкам стали Г13 намного выше, чем у большинства известных материалов. Однако данная сталь чувствительна к содержанию неметаллических включений и изменению содержания таких элементов, как C, Si, S, а также легированию. По-

этому улучшение структуры износостойкой стали Г13 представляет сложную материаловедческую задачу [11–20].

Целью данной работы являлось определение влияния модифицирующих и органических добавок на структуру и свойства порошковой стали Г13.

Материалы и методы

Исследования проводились на порошковых смесях, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Составы порошковых смесей и способы смешивания

Table 1. Compositions of powder mixtures and mixing methods

№	Составы и виды смешивания
1	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Ni (теплое смешивание)
2	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Cu (теплое смешивание)
3	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (теплое смешивание)
4	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (теплое смешивание)
5	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% ЭБС + Гексан (мокрое смешивание)
6	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 1% ЭБС + Гексан (мокрое смешивание)
7	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (однотадийное смешивание)
8	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (однотадийное смешивание)
9	Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Cu (однотадийное смешивание)
10	Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Ni (однотадийное смешивание)
11	Fe + 13% FeMn + 1,3% C (однотадийное смешивание)
12	Fe + 14% FeMn + 1,1% C + 1% Al ₂ O ₃ (нано) (однотадийное смешивание)
13	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + ZrO ₂ (нано) (однотадийное смешивание)

В качестве основы для изготовления исследуемых порошковых смесей был взят железный порошок марки ПЖРВ 2.200.28 (ТУ 14–1–5365–98) производства ПАО «Северсталь». В качестве легирующих добавок применялись: графит искусственный специальный малозольный ГИСМ (ТУ 48-20-54-84) и порошок ферромарганца ФМн 78 (ГОСТ 4755-91).

В качестве модифицирующих добавок применялись: порошок наноксида алюминия и порошок наноксида циркония.

В качестве органических добавок применялись: этилен-бис-стеаромид, стеарат никеля, стеарат меди, стеарат марганца, стеарат железа.

Методика получения образцов

В первую очередь на конусной инерционной дробилке был измельчен ферромарганец, потом проводилось фракционирование и доизмельчение до размера частиц 80 мкм и менее, после чего измельченный порошок ферромарганца смешивался с порошком железа, далее вводили

углерод и различные органические и модифицирующие добавки.

Смешивание проводили по нескольким вариантам:

1. Одностадийное смешивание в течение 60 мин. Его проводили в смесителях «Турбула» или двухконусном смесителе.

2. Двухэтапное смешивание. На первом этапе смазка смешивалась со смесью порошка железа и порошка ферромарганца в течение 60 мин. Затем вводился графит и проводился второй этап смешивания в лопастном смесителе с подогревом $T = 80^{\circ}\text{C}$ еще в течение 30 мин.

3. Двухэтапное смешивание. На первом этапе, как и в предыдущем варианте, смазка смешивалась со смесью порошка железа и порошка ферромарганца в течение 60 мин. Затем вводили графит, также вводили либо этиловый спирт, либо гексан и проводили второй этап смешивания в лопастном смесителе в течение 30 минут.

Формование порошковых смесей проводилось на лабораторном гидравлическом прессе в стальных пресс-формах. Диаметр пресс-форм составлял 12 мм. Для определения уплотняемости и выбора оптимального давления прессования его варьировали от 200 до 900 МПа.

Спекание проводилось в 2 этапа. Первый этап – в трубчатой печи, температура нагрева составляла 1000°C , изотермическая выдержка 1 час, атмосфера спекания – водород. На данном этапе применялась засыпка из оксида алюминия, служащая для предотвращения припекания образцов друг к другу. Охлаждение проводили в течение 15 минут до комнатной температуры в камере-холодильнике, которая охлаждается проточной водой. Целью

данного спекания являлось выжигание летучих легкоплавких материалов. Его можно считать предварительным.

Второй этап спекания проводился в вакуумной печи, температуры нагрева составляли 1200°C и 1300°C , выдержка при нагреве 1 час. Охлаждение происходило вместе с печью в течение 5 часов.

Методика проведения испытаний

Для исследования структуры применялся электронный микроскоп марки S-3400N фирмы Hitachi High-Technologies Corporation, который оснащен рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN.

Для определения твердости исследуемых образцов применяли метод Роквелла. В качестве индентора был выбран стальной закаленный шарик диаметром 1,56 мм. Нагрузка прилагалась последовательно в две стадии (ГОСТ 9013-59): сначала предварительная, обычно равная 10 кгс (для устранения влияния упругой деформации и различной степени шероховатости), а затем основная 100 кгс.

Испытания на изгиб проводили на электрогидравлической разрывной машине HUS-2010z системы MFL в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера IBM PX. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 14019-80. Для проведения испытания на изгиб были изготовлены образцы размером $42 \times 6 \times 6$ мм.

Результаты и их обсуждение

Структуры стали Г13, полученные с помощью электронной микроскопии, представлены на рисунках 1–13.

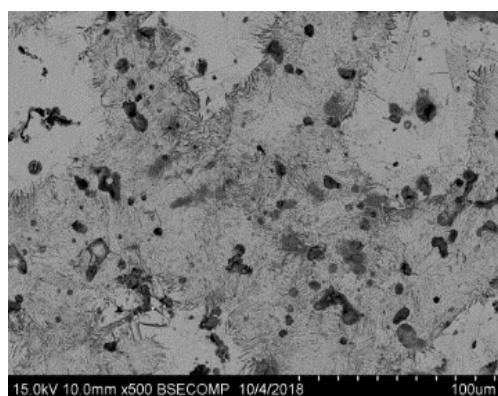
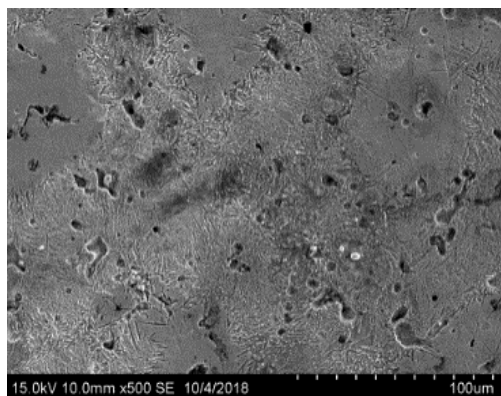


Рис. 1. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Ni (теплое смешивание)

Fig. 1. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Ni (warm mix)

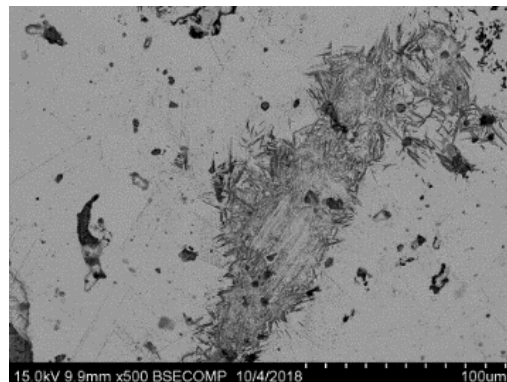
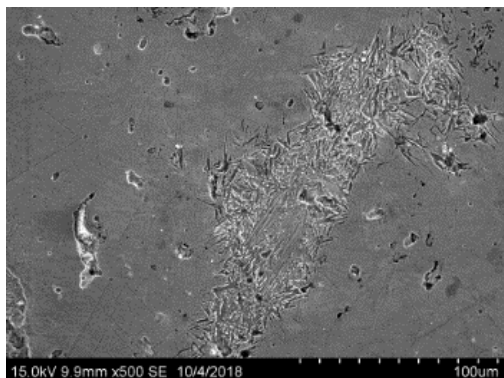


Рис. 2. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Cu (теплое смешивание)

Fig. 2. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Cu (warm mix)

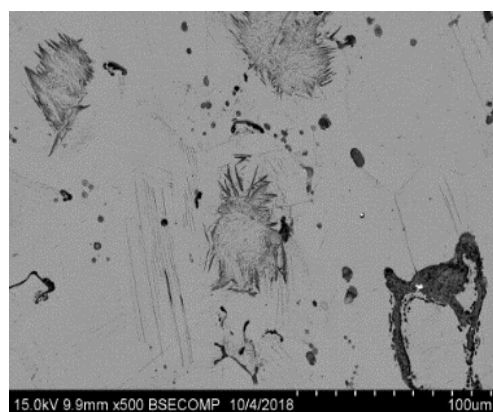
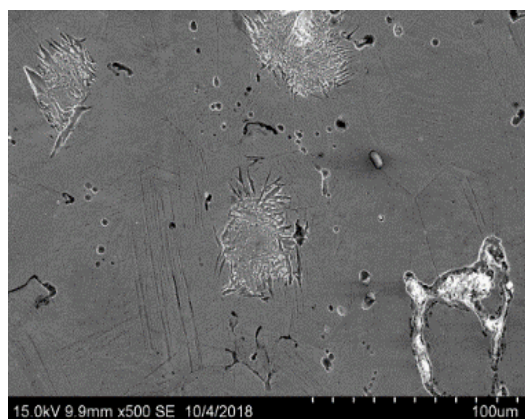


Рис. 3. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (теплое смешивание)

Fig. 3. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Mn (warm mix)

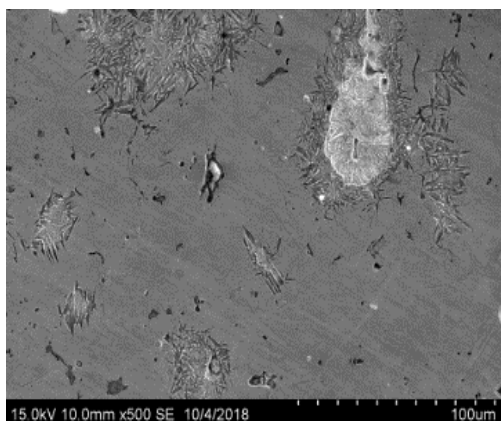


Рис. 4. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5%Ст. Fe (одностадийное смешивание)

Fig. 4. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Fe (single-stage mixing)

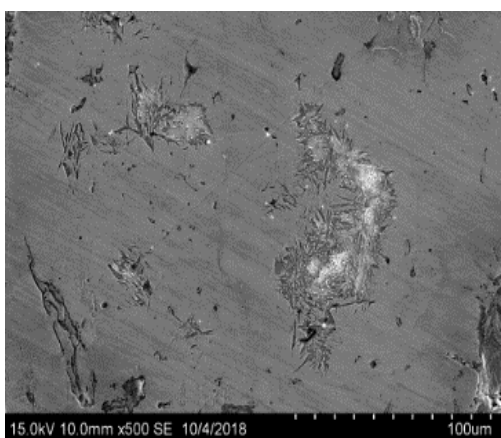
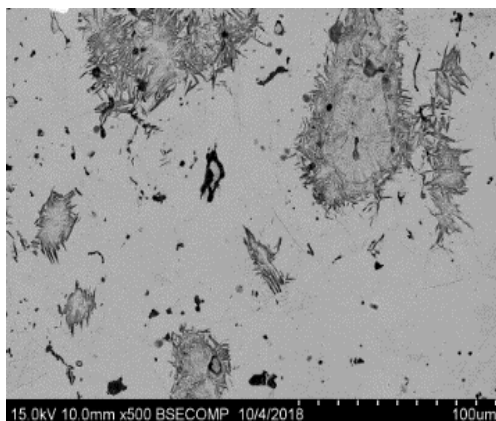


Рис. 5. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (теплое смешивание)

Fig. 5. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Fe (warm mix)

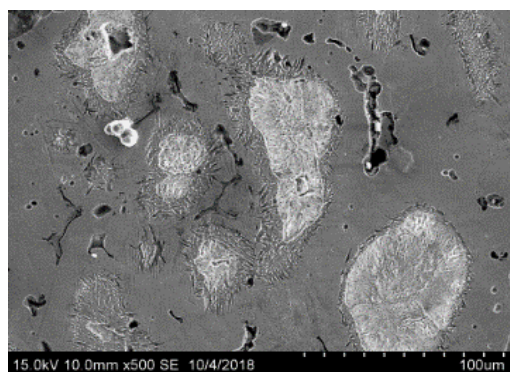
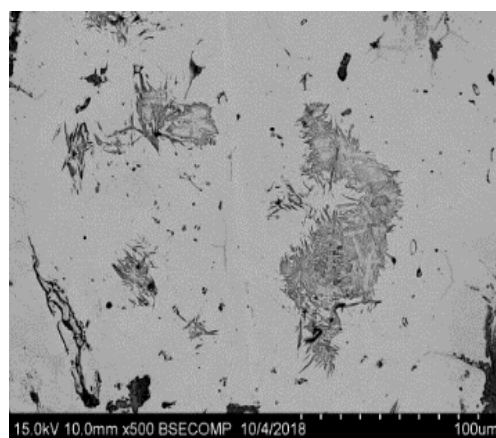
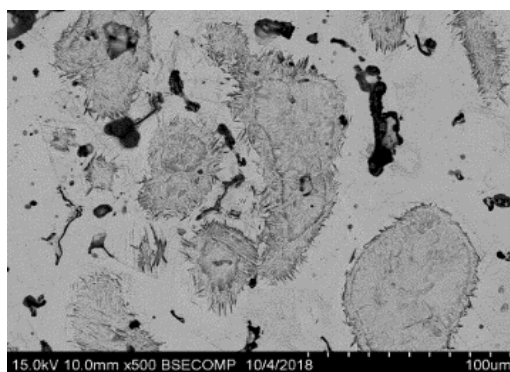


Рис. 6. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Ni (одностадийное смешивание)

Fig. 6. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% St. Ni (single-stage mixing)



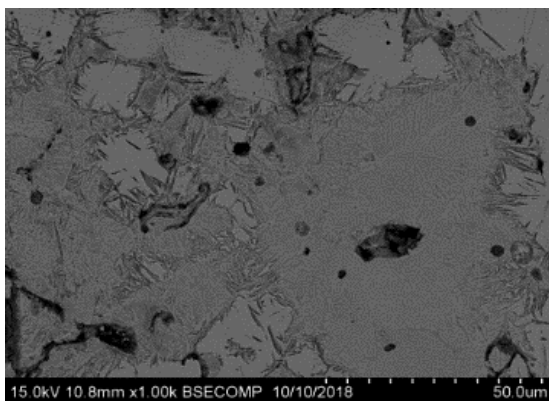


Рис. 7. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% ЭБС+ Гексан (мокрое смешивание)

Fig. 7. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 0.5% EBS + Hexane (wet mixing)

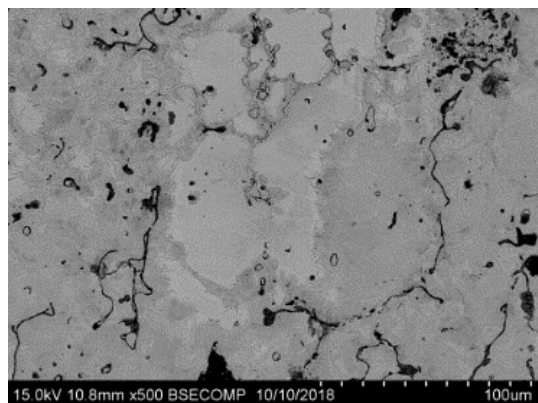
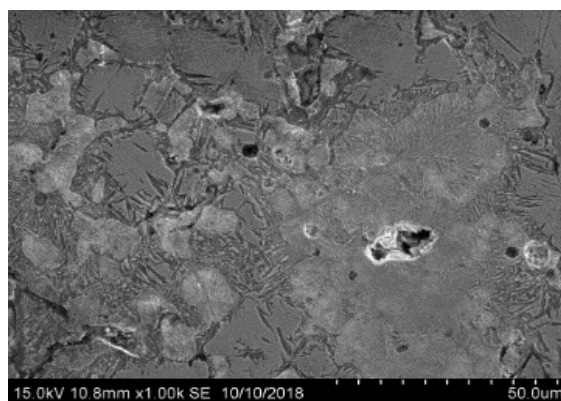


Рис. 8. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 1% ЭБС+ Гексан (мокрое смешивание)

Fig. 8. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + 1% EBS + Hexane (wet mixing)

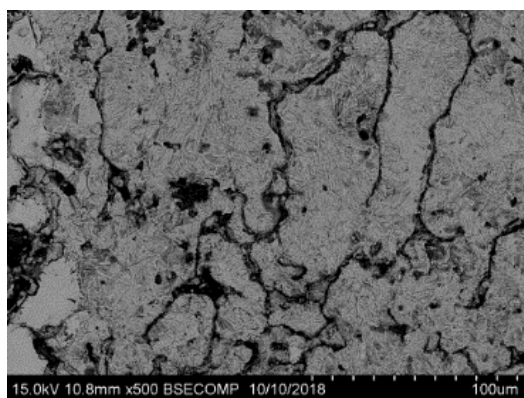
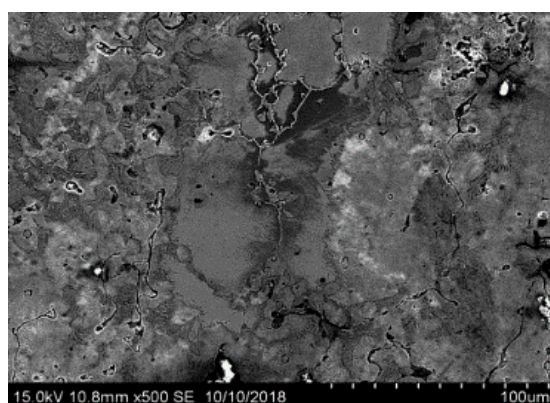
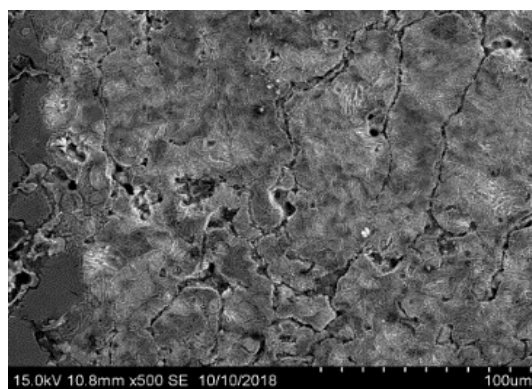


Рис. 9. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14% FeMn + 1,1% C + 1% Al₂O₃ (нано) (одностадийное смешивание)

Fig. 9. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14% FeMn + 1.1% C + 1% Al₂O₃ (nano) (single-stage mixing)



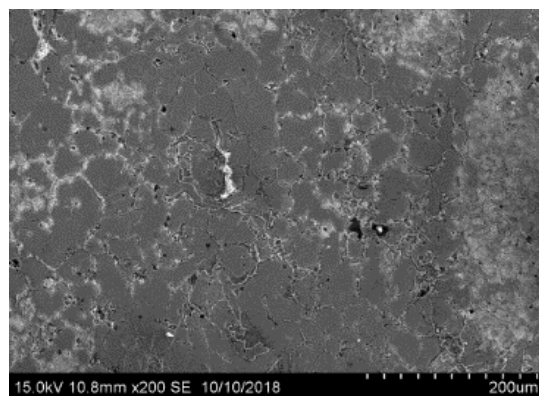
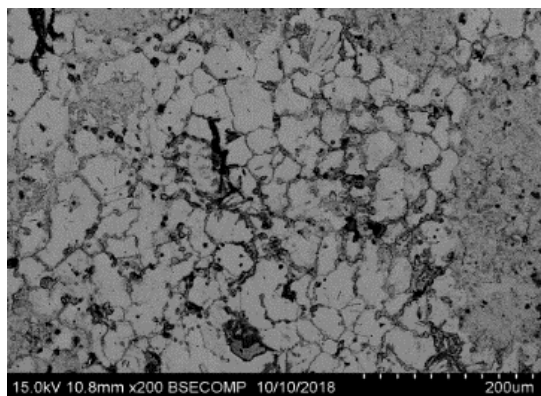


Рис. 10. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + ZrO₂(нано) (однстадийное смешивание)

Fig. 10. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 14.5% FeMn + 1.2% C + ZrO₂ (nano) (single-stage mixing)

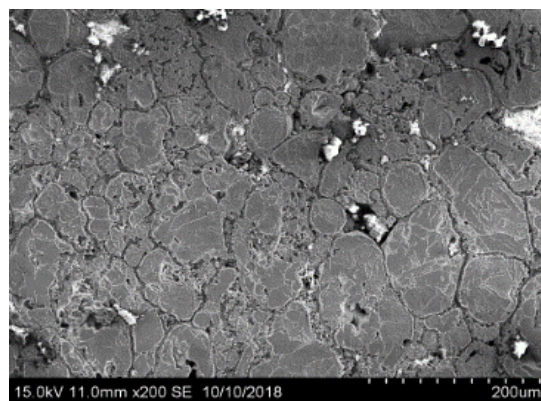
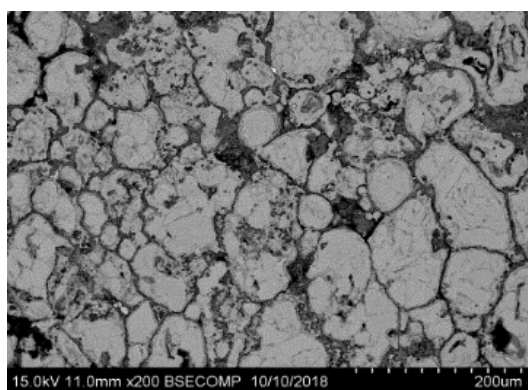


Рис. 11. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 13%FeMn + 1,3%C + 1% Ст. Cu (однстадийное смешивание)

Fig. 11. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 13% FeMn + 1.3% C + 1% St. Cu (single-stage mixing)

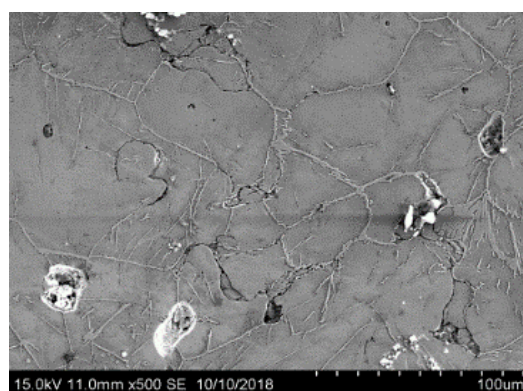
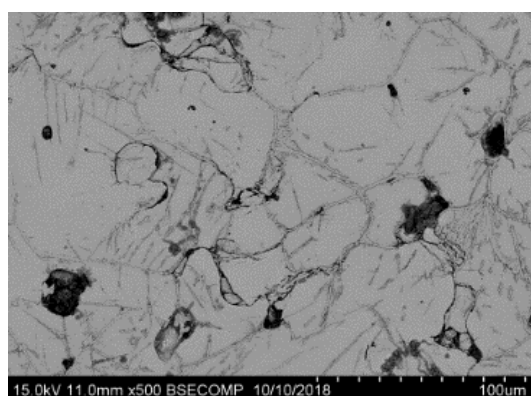


Рис. 12. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 13% FeMn + 1,3% C (однстадийное смешивание)

Fig. 12. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 13% FeMn + 1.3% C (single-stage mixing)

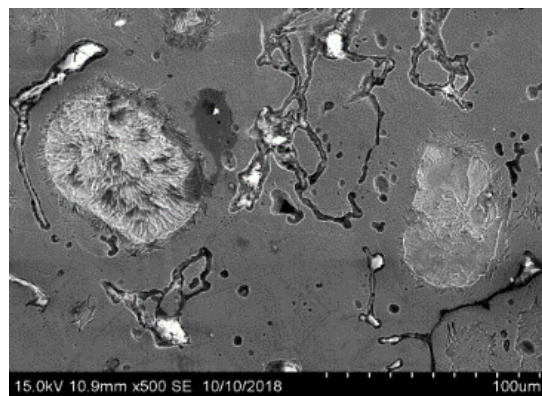
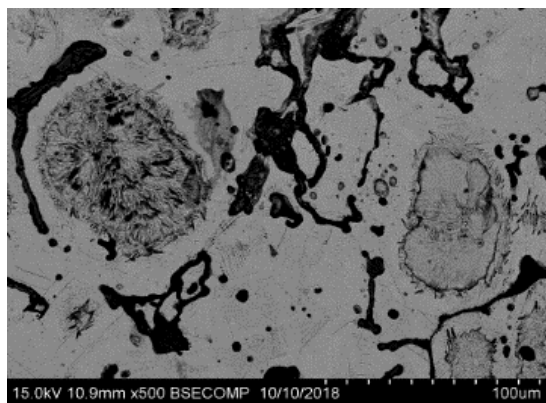


Рис. 13. Микроструктура стали Г13, имеющей состав Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Mn (однотайпное смешивание)

Fig. 13. Microstructure of steel G13, having the composition Fe + 13% FeMn + 1.3% C + 1% St. Mn (single stage mixing)

Из представленных фотографий микроструктуры видно, что наиболее мелкозернистая структура аустенита наблюдается у стали Г13, имеющей следующий состав исходной шихты: Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + ZrO₂(нано), наиболее крупнозернистая структура выявлена у стали Г13, имеющей следующие составы исходной шихты: Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% ЭБС + Гексан (мокрое смешивание); Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (теплое смешивание). Равномерная структура аусте-

нита с мелкими округлыми порами наблюдается у стали Г13, имеющей следующие составы исходной шихты: Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Cu; Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (теплое смешивание).

Механические свойства определялись на образцах, сформированных при давлении 700 МПа. Определялась твердость после первого и второго спекания и прочность при изгибе образцов после двух этапов спекания (табл. 2).

Таблица 2. Сводная таблица механических свойств порошковой стали Г13 при введении органических и модифицирующих добавок

Table 2. Summary table of mechanical properties of powder steel G13 with the introduction of organic and modifying additives

№	Составы	Твёрдость после 1-го спекания, HRB	Твёрдость после 2-го спекания, HRB	Предел прочности на изгиб, МПа
1	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (теплое смешивание)	63±2	125±5	570±30
2	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (теплое смешивание)	45±3	147±9	602±21
3	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Cu (теплое смешивание)	50±1	157±6	644±24
4	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Ni (теплое смешивание)	72±2	178±6	662±33
5	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% Ст. Fe (теплое смешивание)	49±6	166±2	345±15
6	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + 0,5% ЭБС + Гексан (мокрое смешивание)	58±2	180±5	460±35

Окончание таблицы 1

Ending table 1

№	Составы	Твёрдость после 1-го спекания, HRB	Твёрдость после 2-го спекания, HRB	Предел прочности на изгиб, МПа
7	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + + 1% ЭБС + Гексан (мокрое смешивание)	62±3	166±6	585±20
8	Fe + 14% FeMn + 1,1% C + + 1% Al ₂ O ₃ (нано) (одностадийное смешивание)	56±4	169±10	624±19
9	Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + + ZrO ₂ (нано) (одностадийное смешивание)	64±6	152±7	479±13
10	Fe + 13% FeMn + 1,3% C (одностадийное смешивание)	68±4	171±5	373±22
11	Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Ni (одностадийное смешивание)	–	–	380±30
12	Fe + 13% FeMn + 1,3% C + 1% Ст. Cu (одностадийное смешивание)	–	–	485±32
13	Fe + 13% FeMn + 1% C + 0,5% Ст. Mn (одностадийное смешивание)	66±4	145±4	316±27

Как видно из данных, представленных в таблице 2, у всех образцов после проведения 2 спекания идет увеличение твердости. Это связано с прохождением массопереноса при спекании и поверхностной миграции вещества, а также с объемным течением вещества, которое обусловлено сокращением объема пор.

Наилучшим сочетанием твердости после 2-го спекания и прочности на изгиб обладают заготовки из порошковой смеси состава Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + + 0,5% Ст. Ni.

Выводы

1. Наиболее мелкозернистая структура аустенита наблюдается у стали Г13,

имеющей следующий состав исходной шихты: Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + + ZrO₂(нано).

2. Равномерная структура аустенита с мелкими округлыми порами наблюдается у стали Г13, имеющей следующие составы исходной шихты: Fe + 13% FeMn + + 1,3% C + % Ст. Cu; Fe + 14,5% FeMn + + 1,2% C + 0,5% Ст. Mn (теплое смешивание).

3. Наилучшим сочетанием твердости после спекания и прочности на изгиб обладают заготовки из порошковой смеси состава Fe + 14,5% FeMn + 1,2% C + + 0,5% Ст. Ni.

Список литературы

1. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. М.: МИСиС, 2002. 318 с.
2. German R. M. Powder metallurgy and particulate materials processing: The processes, materials, products, properties and applications. Princeton, USA, Metal Powder Industries Federation, 2005. 528 p.

3. Гарост А. И. Влияние марганца на микросостав и характеристики экономнолегированных марганцовистых сталей // Литье и металлургия. 2006. № 4. С. 107–114.
4. Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы развития: монография / В. В. Савич, С. А. Оглезнева. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. 695 с.
5. High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships / O. Bouaziz, S. Allain, C. P. Scott, P. Cugy, D. Barbier // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2011. Vol. 15(4). P. 141–168.
6. Богачев И. Н., Еголаев В. Ф. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. 295 с.
7. Современные технические решения повышения эксплуатационных свойств отливок из стали марки 110Г13Л / И. В. Михалкина, Д. Ю. Бычков, Б. Н. Мамедов, М. М. Наими // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2019. № 18. С. 72–81.
8. Бутенко В. И., Демешкин А. С., Гусакова Л. В. Особенности обработки и эксплуатации деталей машин из стали 110Г13Л // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов н/Д: Донской гос. техн. ун-т, 2020. С. 493–498.
9. Эгамбердиев, И. П., Шарафутдинов У. З., Улугов Г. Д. Исследование влияния состава и структуры на стали 110Г13Л // Journal of Advances in Engineering Technology. 2021. No. 2. P. 57–64.
10. Демент Т. В. Влияния модифицирования стали 110Г13Л на средний размер зерен и включений // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Нац. исслед. Томский политехнический ун-т. Томск, 2017. С. 99–101.
11. Чердынцев В. В., Калошкин С. Д., Томилин И. А. Фазовый состав и особенности структуры механосплавленных железомарганцевых сплавов // Физика металлов и металловедение. 2003. Т. 95, вып. 4. С. 39–47.
12. Волосевич П. Ю., Гриднев В. Н., Петров Ю. Н. Влияние марганца на энергию дефекта упаковки в сплавах железо-марганец // Физика металлов и металловедение. 1976. Т. 42, вып. 2. С. 372–376.
13. Богачев И. Н., Филиппов М. А. Упрочнение высокомарганцевых сталей со структурой е-мартенсита при легировании и термомеханической обработке // Высокопрочные немагнитные стали. М.: Наука, 1978. С. 49–56.
14. Жердицкая Н. Н., Еремеева Ж. В. Влияние технологических факторов на структурообразование и свойства порошковой стали ПК Г13. Сообщение 1. Влияние неоднородности химического состава и пористости на структурообразование и свойства порошковой стали ПК Г13 // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012. № 4. С. 3–7.
15. Влияние технологических факторов на структуру и свойства порошковой углеродистой стали, полученной электроимпульсным спеканием и упрочненной наночастицами / В. С. Панов, Р. А. Скориков, Ж. В. Еремеева [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 2, № 2 (16). С. 283–290.
16. Влияние температуры отпуска на стойкость арматурной стали 20ГС2 против водородного растрескивания / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 54–67.
17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозийного диспергирования / Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, А. С. Чернов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85–90.
18. Дьячкова Л. Н., Дечко М. М. Влияние нанодисперсных добавок на структуру и свойства порошковой углеродистой и высокохромистой стали // Нанотехнологии: наука и производство. 2015. № 3 (35). С. 5–14.
19. Панов В. С., Скориков Р. А. Влияние наноразмерных легирующих добавок на структуру и свойства порошковых углеродистых сталей // Нанотехнологии: наука и производство. 2015. № 3 (35). С. 40–45.
20. Влияние природы углерода и исходной пористости на структурообразование и свойства порошковой стали Г13П / Г. Х. Шарипзянова, Ж. В. Еремеева, С. С. Хламкова, Е. В. Морозова // Технические науки: интеграция науки и практики: сборник материалов Международного научного е-симпозиума / под ред. доц. Н. Ф. Сириной. Киров: МЦНИП, 2015. С. 54–60.

Reference

1. Libenson G. A., Lopatin V. Yu., Komarnickij G. V. *Processy poroshkovej metallurgii* [Processes of powder metallurgy]. Moscow, MISiS Publ., 2002. 318 p.
2. German R. M. Powder metallurgy and particulate materials processing: The processes, materials, products, properties and applications. Princeton, USA, Metal Powder Industries Federation, 2005. 528 p.
3. Garost A. I. Vliyanie marganca na mikrosostav i harakteristiki ekonomnolegirovannyh margancovistyh stali. *Lite i metallurgiya = Casting and metallurgy*, 2006, no. 4, pp. 107–114.
4. Savich V. V., Oglezneva S. A. Poroshkovaya metallurgiya: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Powder metallurgy: current state and prospects of development]. Perm, Perm National Research Politechnic Univ. Publ., 2021. 695 p.
5. Bouaziz O., Allain S., Scott C. P., Cugy P., Barbier D. High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2011, vol. 15(4), pp. 141–168.
6. Bogachev I. N., Egolaev V. F. *Struktura i svojstva zhelezomargancevyh splavov* [Structure and properties of ferromanganese alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 295 p.
7. Mihalkina I. V., Bychkov D. Yu., Mamedov B. N., Naimi M. M. Sovremennye tekhnicheskie resheniya povysheniya ekspluatatsionnyh svojstv otlivok iz stali marki 110G13L [Modern technical solutions for improving the performance properties of castings from steel grade 110G13L. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki = Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing*, 2019, no. 18, pp. 72–81.
8. Butenko V. I., Demeshkin A. S., Gusakova L. V. Osobennosti obrabotki i ekspluatatsii detalej mashin iz stali 110G13L [Features of processing and operation of machine parts made of steel 110G13L]. *Fundamental'nye osnovy fiziki, himii i mekhaniki naukoyomkih tekhnologicheskikh sistem formoobrazovaniya i sborki izdelij. Sbornik trudov nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostroitelej* [Fundamental foundations of physics, chemistry and mechanics of science-intensive technological systems of shaping and assembly of products. Collection of proceedings of the scientific symposium of mechanical engineering technologists]. Rostov-on-Don, Don. St. Technical Univ. Publ., 2020, pp. 493–498.
9. Egamberdiev I. P., Harafutdinov U. Z. S., Ulugov G. D. Issledovanie vliyaniya sostava i struktury na stali [Investigation of the effect of composition and structure on steel 110G13L]. *Journal of Advances in Engineering Technology = Journal of Advances in Engineering Technology*, 2021, no. 2, pp. 57–64.
10. Dement T. V. Vliyaniya modifitsirovaniya stali 110G13L na srednij razmer zeren i vkluchenij [Influence of modification of steel 110G13L on the average size of grains and inclusions]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nyh nauk. Sbornik nauchnyh trudov XIV Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh* [Prospects for the development of fundamental sciences. Collection of scientific papers of the XIV International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2017, pp. 99–101.
11. Cherdynceev V. V., Kaloshkin S. D., Tomilin I. A. Fazovyj sostav i osobennosti struktury mekhanosplavlennyh zhelezomargancevyh splavov [Phase composition and structural features of mechanically alloyed ferromanganese alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*, 2003, vol. 95, is. 4, pp. 39–47.
12. Volosevich P. Yu., Gridnev V. N., Petrov Yu. N. Vliyanie marganca na energiyu defekta upakovki v splavah zhelezo-marganec [Influence of manganese on stacking fault energy in iron-manganese alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metal science*, 1976, vol. 42, is. 2, pp. 372–376.
13. Bogachev I. H., Filippov M. A. Uprochnenie vysokomargancevyh stalej so strukturoj e-martensita pri legirovanii i termomekhanicheskoy obrabotke [Strengthening of high-manganese steels with the e-martensite structure during alloying and thermomechanical]. *Vysokoprochnye nemagnitnye stali* [High-strength non-magnetic steels]. Moscow, Nauka Publ., 1978, pp. 49–56.
14. Zherdickaya N. N., Ereemeeva Zh. V. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na strukturoobrazovanie i svojstva poroshkovej stali PK G13. Soobshchenie 1. Vliyanie neodnorodnosti himicheskogo sostava i poristosti na strukturoobrazovanie i svojstva poroshkovej stali PK G13 [Influence of technological factors on structure formation and properties of PK G13 powder steel. Message 1. Influence of heterogeneity of chemical composition and porosity on structure formation and properties of PK G13 powder steel].

Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya = Proceedings of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings, 2012, no. 4, pp. 3–7.

15. Panov V. S., Skorikov R. A., Eremeeva Zh. V., eds. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na strukturu i svoystva poroshkovoy uglerodistoy stali, poluchennoy elektroimpul'snym spekaniem i uprochnennoy nanochasticami [Influence of technological factors on the structure and properties of powdered carbon steel obtained by electropulse sintering and hardened with nanoparticles]. *Izvestiya MGTU "MAMI" = Proceedings of MSTU MAMI*, 2013, vol. 2, no. 2 (16), pp. 283–290.

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., eds. Vliyanie temperatury otpuska na stojkost' armaturnoj stali 20GS2 protiv vodorodnogo rastreskivaniya [Influence of tempering temperature on the resistance of reinforcing steel 20GS2 against hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 54–67.

17. Ageev E. V., Ageeva E. V., Chernov A. S., eds. Opredelenie osnovnykh zakonornostej processa polucheniya poroshkov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya [Determination of the main regularities of the process of obtaining powders by the method of electroerosive dispersion]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 1 (46), pp. 85–90.

18. D'yachkova L. N., Dechko M. M. Vliyanie nanodispersnykh dobavok na strukturu i svoystva poroshkovoy uglerodistoy i vysokohromistoy stali [Influence of nanodispersed additives on the structure and properties of powdered carbon and high-chromium steel]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnologies: science and production*, 2015, no. 3 (35), pp. 5–14.

19. Panov V. S., Skorikov R. A. Vliyanie nanorazmernykh legiruyushchih dobavok na strukturu i svoystva poroshkovykh uglerodistykh stalej [Influence of nanosized alloying additives on the structure and properties of powdered carbon steels]. *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo = Nanotechnologies: science and production*, 2015, no. 3 (35), pp. 40–45.

20. Sharipzyanova G. H., Eremeeva Zh. V., Hlamkova S. S., Morozova E. V. Vliyanie prirody ugleroda i iskhodnoj poristosti na strukturoobrazovanie i svoystva poroshkovoy stali G13P [Influence of the nature of carbon and initial porosity on the structure formation and properties of powder steel]. *Tekhnicheskie nauki: integraciya nauki i praktiki. Sbornik materialov mezhdunarodnogo nauchnogo e-simpoziuma* [Engineering sciences: integration of science and practice. Collection of materials of the international scientific e-symposium]; ed. by N. F. Sirina. Kirov, MCNIP Publ., 2015, pp. 54–60.

Информация об авторах / Information about the Authors

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1790-5004

Zhanna V. Eremeeva, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research University MISIS, Moscow, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1790-5004

Тер-Ваганянц Юлия Суреновна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: juliatv1990@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0200-530X

Yuliya S. Ter-Vaganyants, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials Science, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: juliatv1990@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0200-530X