

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.384.64

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ
СТАЛИ 110Г13П МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

© 2020 Н.С. Зубенко, Е.А. Цвелик, Р.В. Пирожков

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Рассмотрены теоретические аспекты оптимизации структуры и свойств аустенитной порошковой стали 110Г13п с помощью метода системного анализа (метод Парето). Подобрана оптимальная температура спекания холоднопрессованных заготовок по критерию максимальной износостойкости стали. Приведены микроструктуры стали 110Г13п в выбранном диапазоне температур спекания. Показана зависимость полученных микроструктур от температуры спекания образцов.

Ключевые слова: порошковая металлургия, динамическое горячее прессование, спекание, системный анализ, оптимизация, метод Парето, микроструктура.

Поступила в редакцию 02.10.2019

После доработки 21.12.2019

Принята к публикации 10.01.2020

Создание современных высокотехнологичных материалов является важнейшей задачей машиностроительной отрасли. В то же время весьма актуальным является вопрос о снижении затрат на производстве. Один из способов снижения затрат – это выбор наиболее оптимального метода производства изделия.

Одним из перспективных методов получения изделий, не требующих дополнительных доработок, или они сводятся к минимуму, является метод горячего прессования (далее – ДГП) порошковых металлических заготовок, который относится к импульсным методам формования с применением высоких скоростей и энергий.

Целью данной работы является оптимизация процесса получения высокоплотной аустенитной порошковой стали 110Г13п, полученной методом ДГП, путем определения оптимального значения параметра, непосредственно влияющего на структуру стали и ее свойства – температуру спекания пористых заготовок, полученных после холодного формования исходной шихты до пористости 15-29%, с применением метода Парето. Метод ДГП включает в себя несколько этапов:

1. Приготовление шихты оптимального химического и гранулометрического состава – этап, который включает в себя смешивание исходных компонентов шихты [1].

2. Механическое активирование шихты – на данном этапе происходит тщательное перемешивание исходных компонентов шихты. Кроме того, вследствие высоких локальных температур уже на данном этапе происходит химическое взаимодействие элементов, что обуславливает получение более гомогенной структуры при спекании холоднопрессованных образцов [2].

3. Холодное прессование – этап, обеспечивающий получение прессованных заготовок с заданной пористостью (обычно в пределах 20%).

4. Спекание холоднопрессованных заготовок – высокотемпературная операция, при которой происходит диффузионное взаимодействие компонентов исходной шихты

до гомогенного состояния. Для исключения окисления порошка спекание проводится, как правило, в защитной атмосфере (диссоциированный аммиак, аргон, углекислый газ и т.п.).

5. Горячее прессование в пресс-форме – этап, на котором заготовка вследствие воздействия высокой энергии удара получает структуру с остаточной пористостью 1-3%, приобретает свойства готового изделия.

Оптимальный химический и гранулометрический состав шихты данной стали был установлен в работе В.И. Власова [3].

Область применения изделий из стали 110Г13 обусловлена свойствами этого материала – высокая износостойкость, способность выдерживать высокие статические и динамические нагрузки. Данные свойства материала обусловлены самоупрочнением поверхности материала, свойственное высокоаустенитным сталям [4, 5]. В качестве выходного параметра, определяющего свойства полученного материала, примем механическую характеристику стали – износостойкость [6].

Температура спекания оказывает решающее влияние на структуру и свойства стали, кроме того, спекание холоднопрессованных заготовок – это наиболее энергозатратный этап формирования материала [7]. Выбор оптимальной температуры спекания заготовок, при которой произойдет формирование аустенитной структуры стали, является важной задачей при изготовлении деталей методом ДГП [8].

При оптимальных параметрах в процессе ДГП получается практически беспористая сталь, которая имеет следующие показатели механических свойств: $\sigma_s = 600-650$ МПа, $\delta \leq 10\%$, КСУ = 0,3-0,4 МДж/м² [3].

Задача исследования: определить такую температуру спекания T , которая обеспечит оптимальные значения трех характеристик стали (табл. 1):

- K_1 – предел прочности,
- K_2 – износ,
- K_3 – коэффициент трения.

Таблица 1 – Опытные значения механических характеристик [The experimental values of the mechanical characteristics]

Температура спекания, °С	Предел прочности, МПа	Износ, г/час	Коэффициент трения, f
1100	487,14	0,046	0,0072
1125	384,1	0,034	0,0074
1150	381,1	0,029	0,0069
1175	331,32	0,02	0,0061
1200	318,9	0,018	0,0058

Такая задача относится к задаче многокритериальной оптимизации, при которой оптимизировать одновременно все параметры сложно или невозможно. Тогда имеет смысл ввести понятие эффективного (оптимального по Парето) решения. Смысл его заключается в том, что нельзя улучшить один параметр объекта оптимизации без ухудшения его другого параметра [9, 10]. Данный критерий был выбран по причине небольшого числа разных значений температуры спекания заготовки, при проведении эксперимента. Более подробно критерий оптимальности Парето будет разобран в исследовательской части данной статьи [11].

Для решения задачи поиска Парето-оптимального решения введем следующие обозначения:

$x \in [1100^\circ\text{C}, 1200^\circ\text{C}]$ – температура спекания исходя из условий проведения эксперимента, составляет от 1100°С до 1200°С.,

$F_1(x)$ – предел прочности,

$F_2(x)$ – износ,

$F_3(x)$ – коэффициент трения.

Введём условия оптимизации:

$F_1(x) \rightarrow \max$ (т.е. предел прочности должен быть максимально возможным);

$F_2(x) \rightarrow \min$ (износ должен стремиться к минимуму);

$F_3(x) \rightarrow \min$ (коэффициент трения, как же как и износ, тоже должен стремиться к минимуму).

Согласно методу поиска Парето-оптимального решения для каждого варианта решения (имеющиеся данные температур 1100, 1125, 1150, 1175, 1200) на основании экспериментальных данных (табл. 1) были построены векторные оценки двух критериев: износа (г/час) и величины предела прочности, МПа (рис. 1).

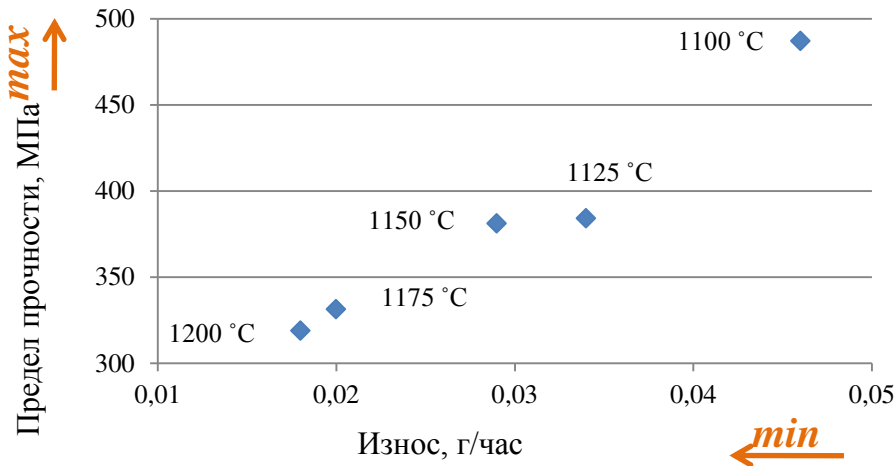


Рисунок 1 – Векторные оценки критериев износа и предела прочности для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of wear criteria and tensile strength for different sintering temperature variants]

На следующем этапе была построена область, отражающая множество Парето. Оптимальные по Парето решения могут находиться на границе этой области (рис. 2).

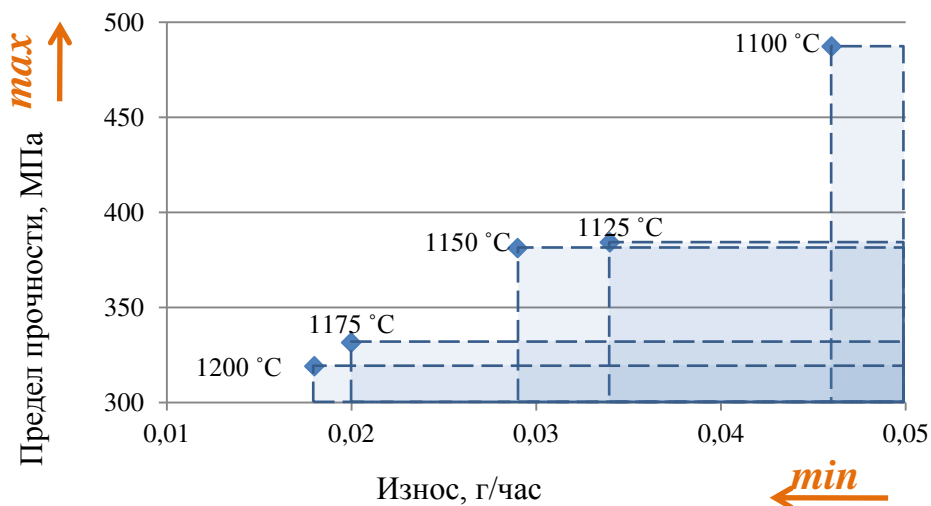


Рисунок 2 – Построение областей заполнения [Building areas of filling]

Ни один маркер не попал в заполненную область другого маркера. Это означает, что для предела прочности и износа любое значение температуры спекания от 1100°C до 1200°C попадает в область оптимальных значений.

Аналогично было проведено сравнение двух других частных критериев: коэффициента трения и предела прочности. На рисунке 3 результат построения векторных оценок для этих критериев.

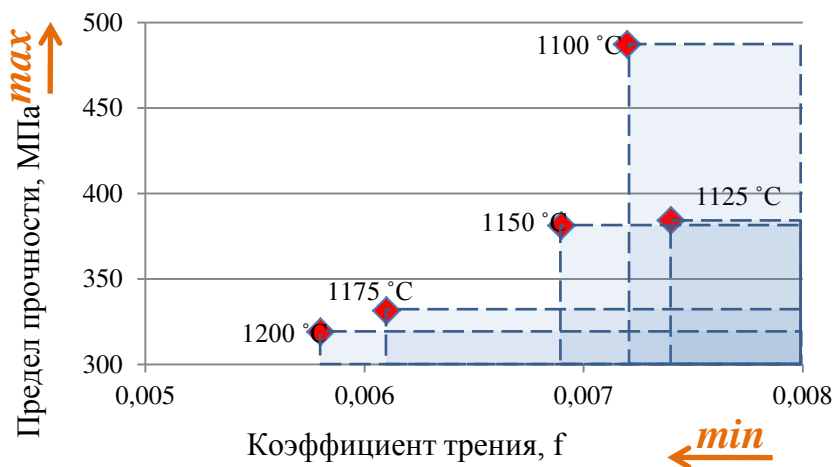


Рисунок 3 – Векторные оценки предела прочности и коэффициента трения для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of tensile strength and friction coefficient for different sintering temperatures]

Маркер, соответствующий температуре спекания 1125 °C не находится на границе области Парето (рис. 3), это означает, что данное значение температуры не является оптимальным.

На рисунке 4 приведен результат построения векторных оценок для двух частных критериев коэффициента трения и предела прочности.

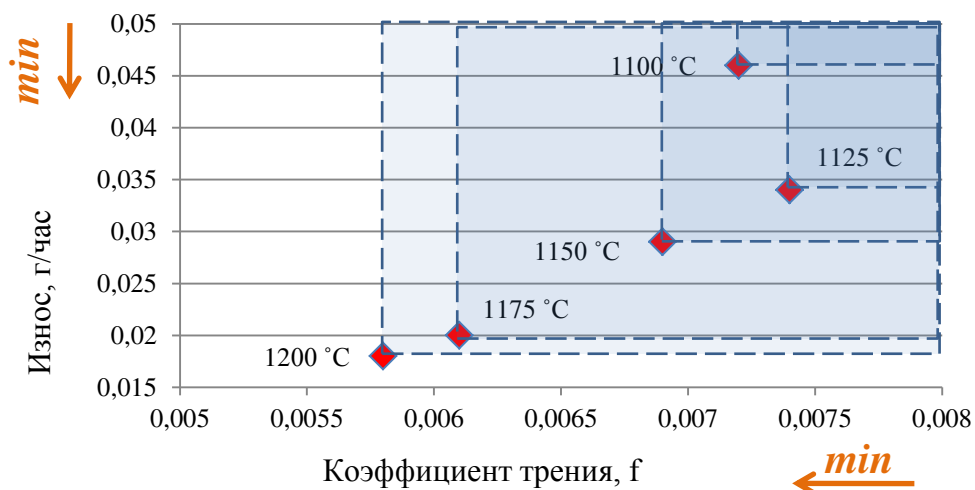


Рисунок 4 – Векторные оценки износа и коэффициента трения для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of wear and friction coefficient for different sintering temperatures]

Здесь мы видим, что четыре варианта решения не находятся на границе области Парето. Для критериев износа и коэффициента трения 1200 °C – это оптимальная температура спекания.

Полученные результаты хорошо соотносятся со структурами стали 110Г12п, полученных при различных температурах спекания.

Микроструктура порошковой стали 110Г13п исследовалась после спекания при 1100-1200 °C (с интервалом 25 °C) в течение двух часов.

При температуре спекания 1100°C образовывалась аустенитная структура с четко выраженными границами аустенитных зерен (рис. 5а). При этой температуре спекания в микроструктуре присутствуют многочисленные включения мартенсита и, в меньшей степени, ферритные включения (рис. 5б).

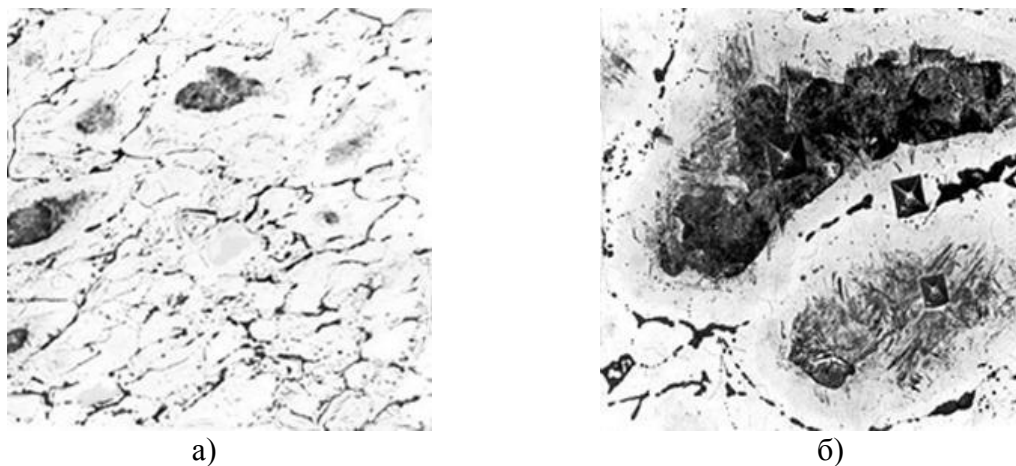


Рисунок 5 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1100°C (а), $\times 200$ и мартенситное и ферритное включения в структуре (б), $\times 500$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1100°C (a) $\times 200$ and martensitic and ferritic inclusions in the structure (b) $\times 500$]

Причиной образования таких локальных зон, в которых образуются нетипичные составляющие структуры для данной группы сталей, является то, что при таких низких температурах ферромарганец не переходит в жидкое состояние, в результате чего не происходит равномерного распределения ферромарганца в процессе спекания по металлической матрице. Контактная поверхность частиц железа и ферромарганца уменьшается, и в результате образуются области, обедненные марганцем и имеющие не аустенитную структуру [12, 13].

Различия в структуре образцов, изготовленных при температурах спекания 1100°C и 1125°C , металлографически не обнаруживаются.

Микроструктура образцов стали 110Г13п, полученных при температуре спекания 1150°C и 1175°C практически одинакова, и отличается от микроструктуры образцов, полученных при температуре спекания 1100°C и 1125°C , отсутствием ферритных включений (рис. 6а), а включения мартенсита очень немногочисленны (рис. 6б).

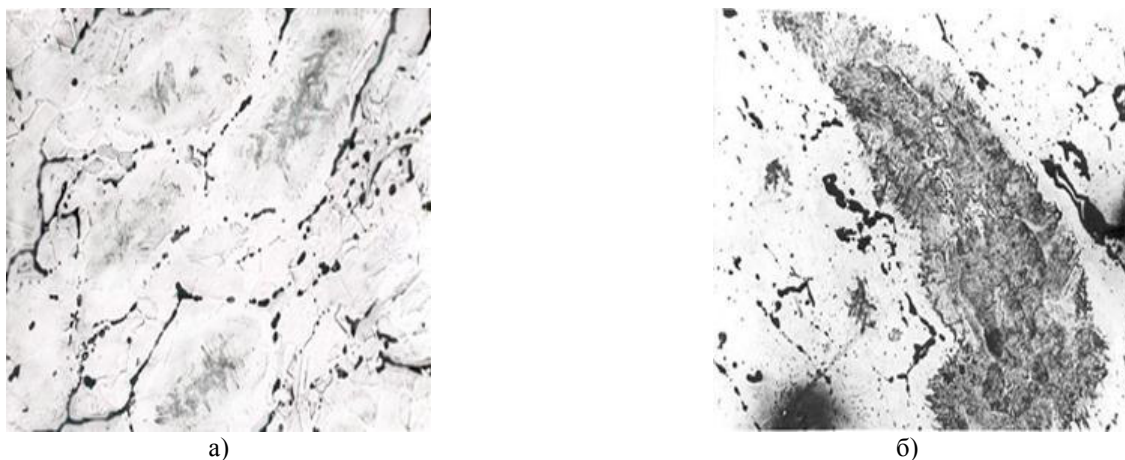


Рисунок 6 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1150°C (а), $\times 200$ и мартенситное включение в структуре при температуре спекания 1150°C (б), $\times 500$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1150°C (a) $\times 200$ and the martensitic inclusion in the structure at sintering temperature of 1150°C (b) $\times 500$]

Ферромарганец практически весь растворился в железе, но из-за относительно невысокой температуре все же остались зоны, в которых диффузия марганца в железо прошла недостаточно полно.

Микроструктура стали 110Г13п после спекания при температуре 1200°C (рис. 7) наиболее близка к литой стали 110Г13л.

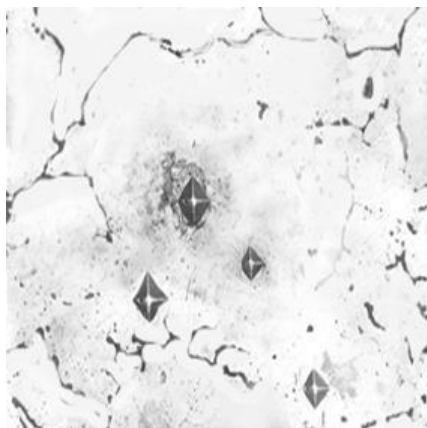


Рисунок 7 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1200°C, $\times 200$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1200°C, $\times 200$]

Исследование области более высоких температур спекания (свыше 1200°C) нецелесообразно по следующим причинам: более интенсивно будет протекать процесс сублимации (переход в газообразное состояние) марганца, приводящий к неполучению требуемой структуры стали 110Г13 [14], существенное увеличение энергозатрат и расходных материалов (инертного газа защитной атмосферы, нагревателей печи и прочее).

Полученные результаты по критериям оптимальности Парето полностью соотносятся с данными практических исследований, полученных при формировании структуры и свойств порошковой стали 110Г13п [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеев, Ю. Г.* Влияние состава на структуру и свойства высокомарганцовистой металлокерамической стали Г13М / Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Новочеркасский политехнический институт. – Ростов-на-Дону : Ростовское книжное издательство, 1969. – Т. 221. – С. 146-151.
2. *Дорофеев, Ю. Г.* Получение металлокерамической высокомарганцовистой стали Г13М // Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Новочеркасский политехнический институт. – Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1969. – Т. 221. – С. 49-57.
3. *Власов, В. И.* Литая высокомарганцовистая сталь / В. И. Власов, Е. Ф. Комолова. – Москва : Машгиз, 1963. – 196 с.
4. *Сабуров, В. П.* Синергетика: новые технологии получения и свойства металлических материалов / В. П. Сабуров. – Москва : Изд-во ИМЕТ АН СССР, 1991. – 51 с.
5. *Волынова, Т. Ф.* Высокомарганцовистые стали и сплавы / Т. Ф. Волынова. – Москва : Металлургия, 1988. – 343 с.
6. *Жердицкий, Н. Т.* Влияние технологических факторов на структуру и свойства стали Г13п / Н. Т. Жердицкий // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы Технической науки – 1975. – № 2. – С. 71-74.
7. *Дорофеев, Ю. Г.* Динамическое горячее прессование в металлокерамике. – Москва : Металлургия, 1972. – 176 с.
8. Повышение качества отливок из стали Г13Л / Под редакцией И. Р. Крянина. – Москва : Машгиз, 1963. – 204 с.
9. *Подиновский, В. В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – Москва : Наука, 1982. – 256 с.
10. *Блауг, М.* Экономическая теория благосостояния Парето // Экономическая мысль в ретроспективе. – Москва : Дело, 1994. – С. 540-561.

11. Давыдов, Н. Г. Свойства, производство и применение высокомарганцевистой стали / Н. Г. Давыдов, В. В. Ситнов. – Москва : Машиностроение, 1996. – 232 с.
12. Воронова, Н. А. Влияние выдержки при закалочной температуре на механические свойства стали Г13Л // Н. А. Воронова, И. Е. Лев, И. З. Машинсон. – 1967. – № 4. – С. 25-27.
13. Дорофеев, Ю. Г. Высокомарганцевистая металлокерамическая сталь / Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Порошковая металлургия. – 1970. – № 11. – С. 28-31.
14. Прасюк, П. Ф. Термическая обработка литых деталей из стали Г13Л // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 1968. – № 9. – С. 63-66.

REFERENCES

1. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Vliyanie sostava na strukturu i svoystva vy`sokomarganczovistoy metallokeramicheskoy stali G13M [Effect of Composition on the Structure and Properties of G13M High-Manganese Cermet Steel]. Novocherkasskiy politexnicheskij institut [Technical Regulations of Novocherkassk Politech Institute]. Rostov-na-Donu. Rostovskoe knizhnoe izdatel'stvo [Rostov-on-Don. Rostov book publishing house], 1969. T. 221. P. 146-151 (in Russian).
2. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Poluchenie metallokeramicheskoy vysokomarganczovistoy stali G13M [Obtaining of G13M Cermet High Manganese Steel]. Novocherkasskiy politexnicheskij institut [Technical Regulations Of Novocherkassk Politech Institute]. Rostov-na-Donu. Rostovskoe knizhnoe izdatel'stvo [Rostov-on-Don. Rostov Publishing House], 1969. T. 221. P. 49-57 (in Russian).
3. Vlasov V.I., Komolova E.F. Litaya vysokomarganczovistaya stal' [High-Manganese Cast Steel]. Moskava [Moscow], Mashgiz. 1963. 196 p. (in Russian).
4. Saburov V.P. Sinergetika: novye tehnologii polucheniya i svoystva metallicheskih materialov [Sinergetics: New Technologies for Production and Properties of Metallic Materials]. Moskava [Moscow], IMETANUSSR, 1991. 51 p. (in Russian).
5. Volynova T.F. Vysokomarganczovistye stali i splavy [High Manganese Steels and Alloys]. Moskava, Metallurgiya [Moscow, Metallurgy]. 1988. 343 p. (in Russian).
6. Zherdinski N.T. Vliyanie tehnologicheskikh faktorov na strukturu i svoystva stali G13p [Influence of Technological Factors on the Structure and Properties of G13P Steel]. Izvestiya Severo-Kavkazskogo nauchnogo centra vysshey shkoly Tehnicheskoy nauki [Bulletin of the North Caucasian Scientific Center of the Higher School of Technical Science]. 1975. No 2. P. 71-74 (in Russian).
7. Dorofeev Y.G. Dinamicheskoe goryachee pressovanie v metallokeramike [Dynamic High Temperature Pressing in the Cermets]. Moskva, Metallurgiya [Moscow, Metallurgy]. 1972. 176 p. (in Russian).
8. Povyshenie kachestva otlivok iz stali G13L [Improving the Quality of Castings from G13L Steel]. Edited by. I.R. Kryanin. Moskva [Moscow]. Gos. nauchn.-tehn. izd-vo mashinostroitel'noy lit [Government Science Technological Publisher of Mechanical Engineering Literature]. 1963. 204 p. (in Russian).
9. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-Optimal Solutions to Multicriteria Tasks]. Moskva, Nauka [Moscow, Science]. 1982. 256 p. (in Russian).
10. Blaug M. Ekonomicheskaya teoriya blagosostoyaniya Pareto [Pareto Economic Theory of Welfare]. Ekonomicheskaya mysl' v retrospektive [Economic Thought in Retrospect]. Moskva, Delo [Moscow, Delo]. 1994. P. 540-561 (in Russian).
11. Davydov N.G. Sitynov V.V. Svoystva, proizvodstvo i primeneniye vysokomarganczovistoy stali [Properties, Production and Using of High Manganese Steel]. Moskva, Mashinostroeniye [Moscow, Mashinostroeniye]. 1996. 232 p. (in Russian).
12. Voronova N.A., Lev I.E., Mashinson I.Z. and other. Vliyanie vyderzhki pri zakalochnoy temperature na mehanicheskie svoystva stali G13L [Effect of Delay at Quenching Temperature on the Mechanical Properties of G13L Steel]. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment Of Metals]. 1967. No 4. P. 25-27 (in Russian).
13. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Vysokomarganczovistaya metallokeramicheskaya stal' [High Manganese Cermet Steel]. Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. 1970. No 11. P. 28-31 (in Russian).
14. Prasuk P.F. Termicheskaya obrabotka litykh detalej iz stali [Heat Treatment of Cast Parts from G13L Steel]. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1968. No 9. P. 63-66 (in Russian).

Technology Optimization for Producing 110G13P Powder Steel by System Analysis Methods

N.S. Zubenko¹, E.A. Tsvelik², R.V. Pirozhkov³

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹*ORCID iD: 0000-0001-5682-519X*
WoS Researcher ID: AAD-4371-2020

e-mail: paradizka007@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0001-9048-275X*
WoS Researcher ID: G-3560-2018

e-mail: stvelik@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0002-1547-6568*
WoS Researcher ID: AAD-3193-2020

e-mail: roman-3.14@yandex.ru

Abstract – The paper deals with theoretical aspects of optimizing the structure and properties of 110G13P austenitic powder steel using the system analysis method (Pareto method). The optimal sintering temperature of cold-pressed work pieces is selected using the criterion of maximum wear resistance of steel. Microstructures of 110G13P steel in the selected range of sintering temperatures are given. The dependence of the obtained microstructures on the sintering temperature of samples is shown.

Keywords: powder metallurgy, dynamic high temperature pressing, sintering, system analysis, optimization, Pareto method, microstructure.