

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-14-21

Влияние параметров газовой атомизации сплава ХН60М на характеристики порошка для лазерной наплавки

© 2019 г. К.В. Калинин, С.А. Оглезнева, М.С. Нагаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 22.10.18 г., доработана 29.01.19 г., подписана в печать 31.01.19 г.

Объектом исследования были порошки сплава ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1). Приведен обзор методов изготовления изделий из жаропрочного сплава ХН60М с анализом их преимуществ и недостатков. Показано, что в сравнении с литейной технологией и горячим прессованием порошков из высоколегированных специальных сталей и сплавов аддитивные технологии позволяют получать изделия сложной формы с высоким уровнем физико-механических свойств и коэффициента использования материала. Невысокие литейные свойства изучаемого сплава обуславливают проведение исследований процесса атомизации для удовлетворения требований к размерам, форме, морфологии и текучести порошков для аддитивных технологий. Цель работы состояла в изучении влияния давления аргона при газовой атомизации на физические, химические, технологические свойства порошков для лазерной наплавки, полученных из сплава ХН60М. Для изготовления металлического порошка марки ХН60М была использована технология газового распыления жидкого расплава аргоном на лабораторном атомизере VIGA 2B при температуре 1560 °С и варьировании давления распыляющего газа в диапазоне 22–25 мбар. Для выбора параметров атомизации с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов «ProCAST» методом конечных элементов вычислены значения вязкости расплава и построена ее температурная зависимость. С помощью электронной и оптической микроскопии, лазерной седиментации исследованы форма и размеры частиц, гранулометрический состав. Данные количественной металлографии обрабатывали с помощью программы «ВидеоТест 4». Измерена текучесть порошков. Установлено, что при увеличении давления распыляющего газа повышалась доля сферических частиц и улучшалась текучесть порошков; значения диаметра Фере, среднего размера частиц и d_{50} изменялись незначительно. Получена экспериментальная зависимость повышения выхода порошка целевой фракции (40–80 мкм) при уменьшении объема подачи распыляющего газа. Установлена обратно пропорциональная зависимость доли сферических частиц от доли целевой фракции. Результаты исследования дают возможность прогнозировать величины выходных параметров порошков при атомизации стали ХН60М. Характеристики порошков фракции –80+40 мкм с коэффициентом формы 0,99 и текучестью 14–15 с позволяют использовать их для изготовления изделий с помощью аддитивных технологий.

Ключевые слова: моделирование, вязкость, технологические свойства, форма частиц, целевая фракция, порошок, давление газа, аддитивные технологии, сталь, газовая атомизация, атомизер VIGA 2B.

Оглезнева С.А. – докт. техн. наук, проф. кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» (МТиКМ) ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). E-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Нагаев М.С. – аспирант кафедры МТиКМ, ПНИПУ. E-mail: kvint159@yandex.ru.

Калинин К.В. – аспирант кафедры МТиКМ, ПНИПУ. E-mail: kirk199@yandex.ru.

Для цитирования: Калинин К.В., Оглезнева С.А., Нагаев М.С. Влияние параметров газовой атомизации сплава ХН60М на характеристики порошка для лазерной наплавки. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2019. No. 1. С. 14–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-14-21.

Kalinin K.V., Oglezneva S.A., Nagaev M.S.

Influence of gas atomization parameters of alloy KhN60M on the characteristics of powder for laser surfacing

The object of the study was alloy powders KhN60M (EP367; 06Kh15N60M1). An overview of methods for manufacturing products from heat-resistant alloy KhN60M with an analysis of their advantages and disadvantages is given. It is shown that in comparison with injection molding and hot pressing of powders from high-alloyed special steels and alloys, additive technologies allow to obtain products of complex shape with a high level of physical and mechanical properties and material utilization. The low casting properties of the alloy under study cause the research of the atomization to meet the requirements for size, shape, morphology and fluidity of powders for additive technologies. The goal of the work was to study the effect of argon pressure during gas atomization on the physical, chemical, technological properties of powders for laser surfacing, obtained from alloy KhN60M. The technology of gas spraying of liquid melt with argon on a VIGA 2B laboratory atomizer at a temperature of 1560 °C and varying the pressure of the spraying gas in the range of 22–25 mbar was used for the manufacture of metal powder KhN60M. To select the atomization parameters, the melt viscosity values were calculated using the finite element method and its temperature dependence was constructed. The calculations were made with the ProCAST computer modeling system for casting processes. The shape and size

of particles, the grain size composition were investigated using laser sedimentation, electron and optical microscopy. Quantitative metallography data were processed using the VideoTest 4 software. Fluidity of powders was measured. It was found that with increasing pressure of the spraying gas, the proportion of spherical particles increased and the fluidity of the powders improved; Feret diameter, average particle size, and d50 values did not change significantly. An experimental dependence of the increase in the yield of the powder of the target fraction (40–80 μm) with a decrease in the volume of the spray gas supply was obtained. An inversely proportional dependence of the fraction of spherical particles on the fraction of the desired cut was established. The results of the study make it possible to predict the values of the output parameters of powders during the atomization of steel KhN60M. Characteristics of powders of the $-80+40 \mu\text{m}$ fraction with a shape factor of 0.99 and a yield point of 14–15 g/s make it possible to use them for the manufacture of products using additive technologies.

Keywords: modeling, viscosity, technological properties, particle shape, desired cut, powder, gas pressure, additive technologies, steel, gas atomization, VIGA 2B atomizer.

Oglezneva S.A. – Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of materials, technologies and machine design of the Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) (614990, Russia, Perm, Komsomolskii pr., 29). E-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Nagaev M.S. – postgraduate student of the Department of materials, technologies and machine design of the PNRPU. E-mail: kvint159@yandex.ru.

Kalinin K.V. – postgraduate student of the Department of materials, technologies and machine design of the PNRPU. E-mail: kirk199@yandex.ru.

Citation: Kalinin K.V., Oglezneva S.A., Nagaev M.S. Influence of gas atomization parameters of alloy KhN60M on the characteristics of powder for laser surfacing. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2019. No. 1. P. 14–21 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-14-21.

Сплав марки ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1) обладает высокой предельно допустимой рабочей температурой (1200–1250 °С) [1, 2] и достаточным уровнем механических свойств при длительной эксплуатации под воздействием высоких температур и напряжений [3], поэтому изделия из этого сплава используют для производства ответственных деталей, в том числе для изготовления и восстановления деталей сопловых и рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), судовых и стационарных газовых турбин установок для перекачки нефти и нефтепродуктов, в нагревателях металлургических печей и многих других устройствах [1].

Химический состав сплава ХН60М, мас. %: Ni — основа; 14,0–16,0 Cr; 14,0–16,0 Mo; $\leq 4,0$ Fe; $\leq 0,08$ C; 1,0–2,0 Mn; $\leq 0,50$ Si; $\leq 0,015$ S; $\leq 0,015$ P [1]. Этот сплав относится к группе нихромов и промышленно выпускается в настоящее время в виде проката и проволоки. Порошок из этого сплава для применения в аддитивных технологиях востребован в машиностроении для получения изделий методами горячего прессования, селективного лазерного спекания и лазерной наплавки, но пока производится только экспериментальными партиями в связи с накоплением опыта его производства.

Невысокие литейные свойства жаропрочных никелевых сплавов [4], а также их склонность к дендритной ликвации [2, 5], образованию при повышенных температурах тугоплавких пленок

оксида никеля, пор, трещин и других дефектов [1, 3] обуславливают трудности при изготовлении из расплавов как отливок, так и порошков. При этом литейные отходы не всегда могут быть подвергнуты переработке [6], что вызывает необходимость повышения экономической эффективности производства совершенствованием методов, например использованием высокоградиентного литья [6–9], а при производстве порошков — оптимизацией параметров атомизации.

К основным преимуществам изготовления изделий из порошков высоколегированных сплавов относятся достижение сложных геометрических форм при высокой точности размеров и чистоте поверхности и отсутствие ликвации в сплаве. Однако сплав ХН60М является высоколегированным никелевым сплавом, в котором образуются интерметаллидные фазы, обладающие при комнатной температуре высокой твердостью и хрупкостью, а следовательно, получение изделий с высокой плотностью обычным холодным прессованием и последующим спеканием практически невозможно. Поэтому для консолидации порошков применяют горячее изостатическое прессование (ГИП) [10, 11] или лазерное спекание.

К порошкам, используемым для лазерной наплавки или селективного лазерного спекания, предъявляется ряд требований (определенный узкий гранулометрический состав, химический состав, сферическая форма частиц порошков), которые играют существенную роль в формировании

структуры и свойств консолидированного сплава [12–19].

В настоящее время в мировой практике лидируют два промышленных вида производств металлических порошков:

— газовое распыление расплава, суть которого заключается в механическом воздействии инертного газа (аргона или азота) повышенного давления на струю жидкого металла;

— центробежное распыление расплава под воздействием плазменной струи.

Большой популярностью пользуются установки газоструйного диспергирования, так как центробежный способ обладает такими недостатками, как неоднородность порошков по химическому составу и большой разброс по размерам частиц (50–600 мкм) с низким выходом годного (5–7 %) по фракции 40–80 мкм [19].

Для изготовления порошков, обладающих необходимыми свойствами для лазерной наплавки с высоким выходом годной фракции, целесообразно использовать метод газового распыления жидкого расплава. Этот метод дает возможность получать порошки различных материалов, имеет высокую производительность, является экономичным, позволяет управлять гранулометрическим составом получаемого материала [19].

На размеры и форму образующихся частиц влияют давление и температура газового потока, диаметр струи, температура, поверхностное натяжение, плотность и вязкость расплава [20–24], конструктивное оформление форсуночного устройства.

Уменьшение вязкости и поверхностного натяжения создает благоприятные условия для дробления жидкости, увеличивает вероятность распада струи на капли.

Проблема получения порошка распылением исследуемого расплава ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1) заключалась в том, что этот сплав, предположительно, обладает высокими вязкостью и поверхностным натяжением, что может оказать сильное влияние на форму и размеры частиц. Для улучшения литейных свойств расплава повышение температуры атомизации экономически нецелесообразно ввиду возрастания стоимости из-за увеличения расхода электроэнергии и длительности процесса, поэтому при выполнении работы варьировали давление газа.

Цель работы — исследование влияния давления аргона при газовой атомизации на физичес-

кие, химические и технологические свойства порошков для лазерной наплавки, полученных из сплава ХН60М.

Методики эксперимента и исследования

Моделирование вязкости расплава ХН60М осуществляли в профессиональной системе компьютерного моделирования литейных процессов «ProCAST» (Engineering Systems International Group) методом конечных элементов, которая обеспечивала совместное решение температурной, гидродинамической и деформационной задач с учетом литейных характеристик литейных сплавов.

Для моделирования расплавов использовался модуль «CompuTherm Material Thermodynamic Database» (Fe, Ni, Al, Mg, Ti, Cu и др.), содержащий уникальную термодинамическую базу данных, которая позволяет пользователю после ввода химического состава сплава получить температурные зависимости свойств, необходимые для проведения точного расчета литейного процесса. Таким образом были рассчитаны плотность и вязкость расплавов в зависимости от химического состава и температуры.

Диспергирование сплава ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1) выполняли на лабораторной установке VIGA 2B (ALD, Германия) при температуре 1560 °С, расходе аргона 900±100 м³/ч, диаметре металлопровода (сопла) 5,5 мм. В качестве шихтовых материалов применяли прутки сплава диаметром 20 и 55 мм. Распыляющий газ — аргон с чистотой 99,998 %. В экспериментальных испытаниях для получения порошков сплава на основе никеля ХН60М (ЭП367; 06Х15Н60М1) был использован тип сопла форсунки с параллельными стенками, образующими щель в пределах значений 0,6 и 0,75 мм, давление распыляющего газа составляло 22–25 бар в зависимости от режима атомизации:

№ режима	1	2	3	4
P, бар	25±1	24±1	23±1	22±1

Отбор проб экспериментальных порошков после каждого режима атомизации выполняли согласно ГОСТ 23148-78. Определяли содержание кислорода (по ГОСТ 27417-87) на анализаторе АК-7716 (НПО «Эксан», г. Ижевск); содержание легирующих элементов (ГОСТ 18895-81) — на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре EDX 800HS (Shimadzu, Япония). Морфологию частиц

исследовали (ГОСТ 23402-78) с помощью оптического микроскопа «Axiovert 40 MAT» (Zeiss, Германия). Данные количественной металлографии обрабатывали с помощью программы «ВидеоТест 4». Размер частиц оценивали по диаметру Фере, сферичность частиц — по частным радиусам максимально вписанной и минимально вписанной окружностей. Гранулометрический состав определяли ситовым методом (ГОСТ 18318-94, а также ГОСТ 2266-77) на лазерном анализаторе размера частиц «Analysette 22 NanoТес» (Fritsch, Германия). Фазовый состав порошков изучали с помощью дифрактометра XRD-6000 (Shimadzu, Япония).

Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «Vega 3 SEM» (Tescan, Чехия). Текучесть порошков определяли по ГОСТ 20899-98.

Результаты и их обсуждение

В программе «ProCAST» была смоделирована вязкость расплава ХН60М при температурах распыления (рис. 1) в сравнении со сплавом на основе железа 12Х18Н10Т, при распылении которого достижение сферической формы частиц не было трудной задачей [25].

Несмотря на то, что вязкость чистого никеля меньше, чем чистого железа, даже при более низкой температуре (табл. 1), а также на то, что у сплавов 12Х18Н10Т и ХН60М примерно равные температуры ликвидуса, наличие в исследуемом сплаве хрома (в больших концентрациях, чем в сплаве 12Х18Н10Т) и молибдена оказало значительное влияние на повышение вязкости сплава ХН60М.

С понижением температуры вязкость расплава ХН60М закономерно возрастает, причем более существенно по сравнению с расплавом 12Х18Н10Т (см. рис. 1).

Температура диспергирования сплава ХН60М была выбрана следующим образом. Известно, что повышение температуры расплава приводит к увеличению доли мелкой фракции. Так, при превышении температуры ликвидуса на 15 % (1600 °С) гранулометрический состав порошка содержит большую часть мелких фракций — 63±0 мкм [25], при превышении температуры ликвидуса на 10 % (1540 °С) формируется большее количество крупных фракций. Вязкость расплава Х18Н10Т во втором случае составляет $5,6 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м², а для расплава ХН60М это значение вязкости достигается при $t = 1560$ °С.

Таблица 1. Вязкость жидких металлов и сплавов (по данным ProCAST)

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$
Железо	1550	7,0
Никель	1450	5,0
ХН60М	1570	5,6
12Х18Н10Т	1570	5,4

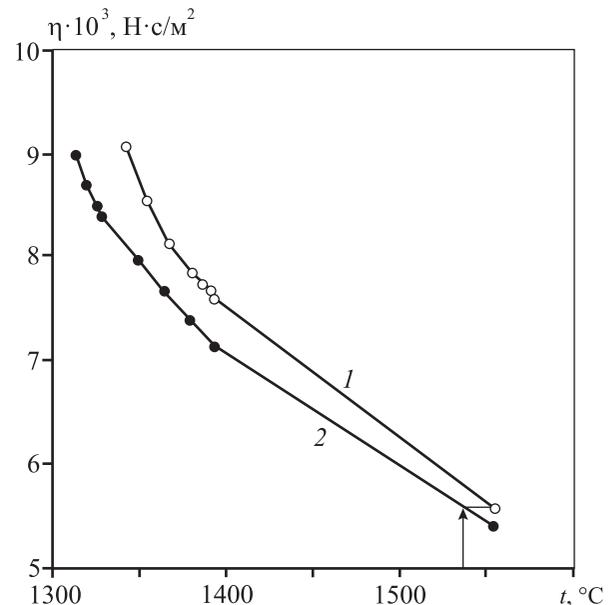


Рис. 1. Зависимость вязкости расплавов ХН60М (1) и 12Х18Н10Т (2) от температуры

Учитывая повышенную вязкость расплава ХН60М, для разрушения струи расплава было выбрано более высокое давление газа, чем для Х18Н10Т.

Анализ химического состава показал, что во всех порошках, полученных по режимам 1–4, содержание кислорода не превышало 0,01 %, а следовательно, во всех случаях на формирование капли и форму частиц оксидные пленки не оказывали влияния, а форму частиц определяли только свойства расплава и условия диспергирования. Содержание легирующих элементов в порошке соответствовало таковому в шихтовом материале с точностью до 0,1 % — во всех партиях порошка. По фазовому составу порошки также не различались — во всех порошках сформировался твердый раствор на основе никеля.

Частицы порошков, полученные при различных давлениях распыления, имеют различную форму (рис. 2).

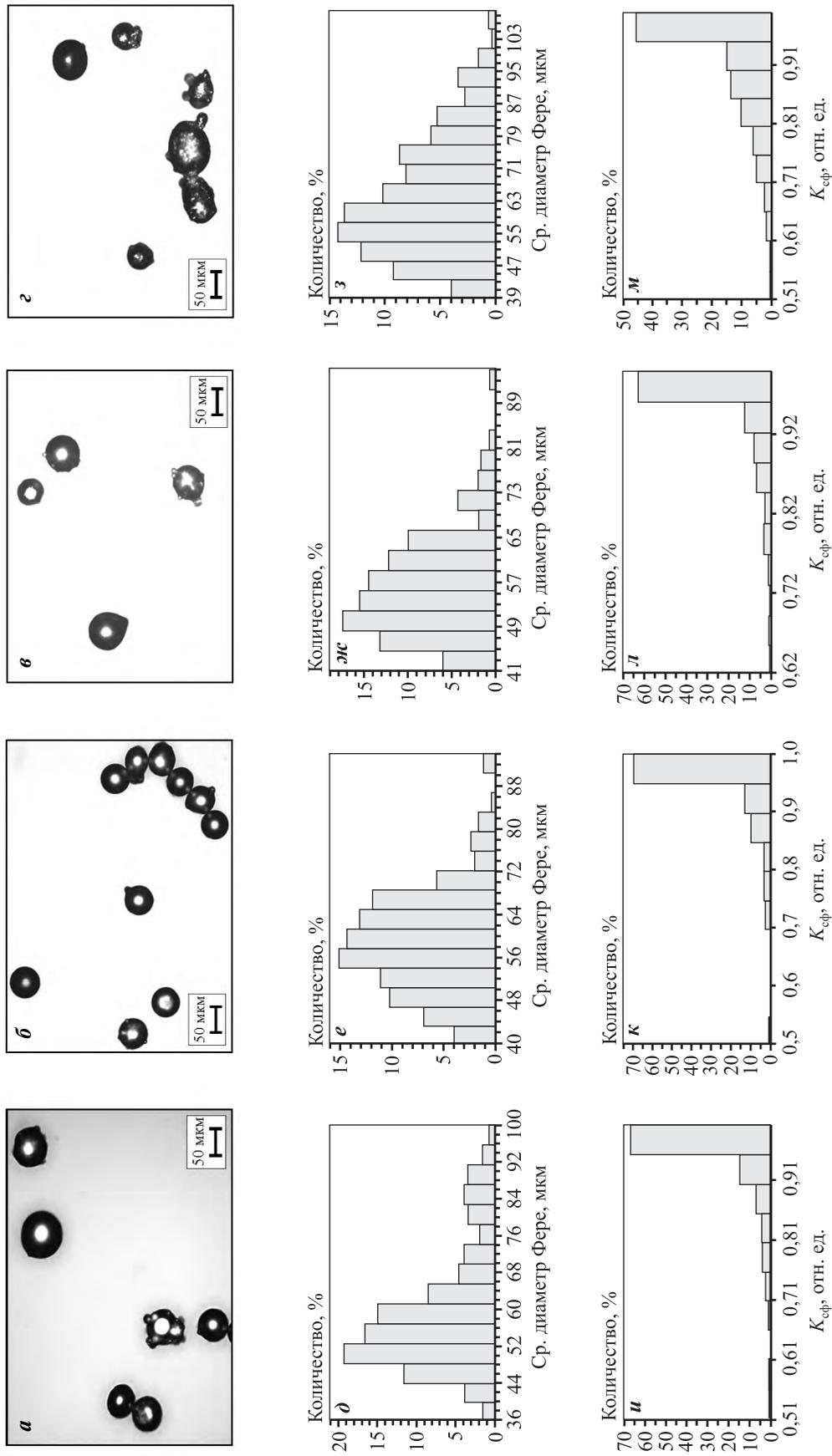


Рис. 2. Фотографии частиц фракции 40–80 мкм, полученных по режимам 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г); гистограммы распределения частиц по размерам (е–з для режимов 1–4 соответственно); фактор формы частиц (и–м для режимов 1–4)

Таблица 2. Характеристики порошков, полученных по разным режимам

№ режима	Текущность, с	Целевая фракция, %	Коэффициент сферичности	Доля сферических частиц, %	$d_{ср}$, мкм	d_{50} , мкм
1	14,6	22	0,99	82	58	51,3
2	15,2	24	0,99	82	59	50,4
3	14,7	27	0,96	75	57	47,7
4	17,6	30	0,94	60	61,5	52,4

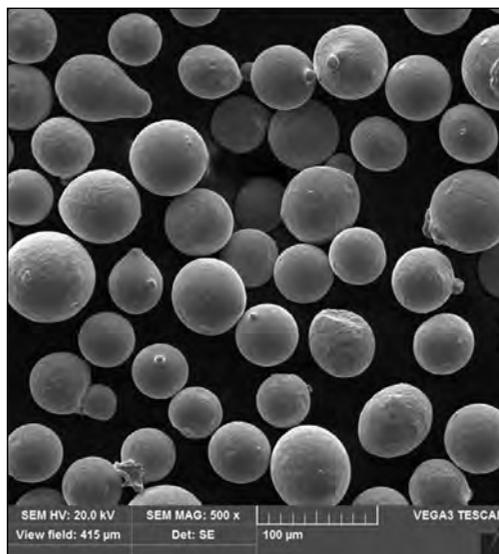


Рис. 3. Изображение со сканирующего микроскопа частиц порошка сплава ХН60М, полученного по режиму 2

Частицы, распыленные при давлении аргона $P = 24 \div 25$ бар (режимы 1, 2), обладают сферической формой — коэффициент сферичности частиц $K_{сф} = 0,99$ (рис. 2, а, б, табл. 2), в составе этих порошков установлена и самая высокая доля сферических частиц (у которых $K_{сф} > 0,9$) — 82 %. На фотографиях доля частиц с сателлитами очень незначительна (рис. 2, а, б, рис. 3).

Анализ изображений частиц, полученных при $P = 22 \div 23$ бар (режимы 3 и 4), показал большое количество частиц несферической формы (рис. 2, в, г), подтвержденное результатами измерений (рис. 2, л, м, табл. 2): коэффициент сферичности равен 0,96 и 0,94, доли сферических частиц — 75 и 60 % соответственно.

Частицы со сферической формой обеспечивают лучшие показатели текущести, чем с неправильной формой, поэтому самый высокий показатель текущести наблюдался у порошка, полученного по режиму 1 (см. табл. 2).

Из результатов измерения текущести порошков

фракции 40—80 мкм, полученных по режимам 1—3 (14,6—15,2 с), следует, что они удовлетворяют требованиям по использованию их в аддитивных технологиях. На характеристику текущести наибольшее влияние оказывают форма и размеры частиц (более крупные и, соответственно, более тяжелые движутся быстрее) [23]. И хотя частицы порошка, полученного по режиму 2, наиболее сферичны, но доля более мелких (более легких) частиц в нем больше (показатель d_{50} немного меньше), чем у порошка, полученного по режиму 1, поэтому время истечения порошка 2 больше. Худшая текущность порошков, полученных по режиму 4, связана с наличием у них большой доли несферических частиц (см. рис. 2, г, табл. 2).

Гранулометрические составы порошков фракции 40—80 мкм, полученных по разным режимам, имеют отличия (рис. 3, д—з), хотя средние размеры их частиц близки. Параметр d_{50} для порошков от всех режимов составляет 47—53 мкм и удовлетворяет требованиям к порошкам для лазерной наплавки.

С гранулометрическим составом связан важный экономический показатель — выход годного по фракции (k). На исследованных режимах выход фракции $-80+40$ мкм составил 22—30 %, причем чем меньше была величина k , тем лучше были форма и текущность порошков (табл. 2). Выход целевой фракции подбирается экспериментально для каждого сплава и оборудования для диспергирования. Анализ полученных результатов выявил монотонно убывающую зависимость целевой фракции и возрастающую зависимость доли сферических частиц при повышении давления распыляющего газа (рис. 4, 5). Также была установлена убывающая зависимость доли сферических частиц от целевой фракции (рис. 6).

Полученные зависимости позволяют оптимизировать параметры атомизации расплава для улучшения технологических характеристик порошков, а также позволяют оценить экономическую эффективность процесса, следующую из со-

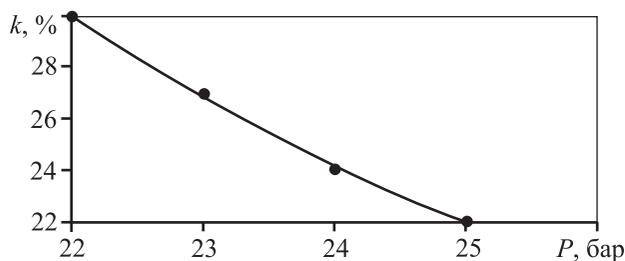


Рис. 4. Зависимость выхода целевой фракции (k) от давления распыляющего газа (P)

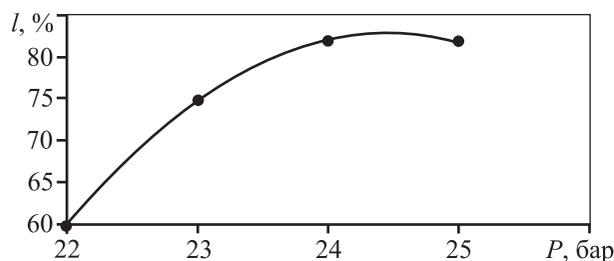


Рис. 5. Зависимость доли сферических частиц (l) от давления распыляющего газа (P)

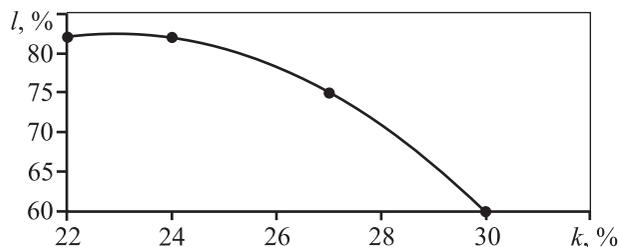


Рис. 6. Зависимость доли сферических частиц (l) от выхода целевой фракции (k)

отношения доли целевой фракции и количества в ней сферических частиц.

Выводы

1. Исследовано влияние давления аргона при газовой атомизации на физические, химические и технологические свойства порошков для лазерной наплавки, полученных при температуре 1560 °С из сплава ХН60М. Установлено, что химический состав фракции $-80+40$ мкм всех порошков не отличается от состава шихтовых материалов. При повышении давления от 22 до 25 бар улучшаются физические и технологические свойства — коэффициент сферичности достигает 0,99, доля сферических частиц возрастает до 82 %, время текучести уменьшается до 14,6 с, однако сокращается выход целевой фракции $-80+40$ мкм с 30 до 22 %.

2. Сравнительный расчет кинематической вязкости расплавов в системе «ProCast» позволяет уточнить температуру распыления экспериментального сплава по известным данным для других сплавов.

Литература/References

1. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А., Гервасьев М.А., Гредитор М.А., Крылова К.М., Кубачек В.В., Мирмельштейн В.А. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989.
Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A., Gervas'ev M.A., Greditor M.A., Krylova K.M., Kubachek V.V., Mirmel'shtein V.A. Marker of steel and alloys. Moscow: Mashinostroenie, 1989 (In Russ.).
2. Братковский Е.В., Заводяный А.В., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А. Специальные стали: Учеб. пос. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2013.
Bratkovskii E.V., Zavodyanyi A.V., Shapovalov A.N., Shevchenko E.A. Special steels. Novotroitsk: NF NITU «MISIS», 2013 (In Russ.).
3. Сорокин И.Л. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. *Сварочное производство*. 1997. No. 4. С. 4—11.
Sorokin I.L. Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1997. No. 4. P. 4—11 (In Russ.).
4. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы. *Все материалы. Энцикл. справочник*. 2012. No. 5. С. 16—21.
Petrushin N.V., Svetlov I.L., Ospennikova O.G. Casting of superalloy nickel alloys. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2012. No. 5. P. 16—21 (In Russ.).
5. Кулешова Е.А., Черкасова Е.Р., Логунов А.В. Дендритная ликвация в никелевых жаропрочных сплавах. *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 1981. No. 6. С. 20—23.
Kuleshova E.A., Cherkasova E.R., Logunov A.V. Dendritic segregation in nickel high-temperature alloys. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1981. No. 6. P. 20—23 (In Russ.).
6. Можарин В.П. Литейное производство. В 2 кн. Кн. 2. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011.
Mozharin V.P. Casting production. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011 (In Russ.).
7. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М., Орехов Н.Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов. *Технол. легких сплавов*. 2007. No. 2. С. 60—70.

- Kablov E.N., Toloraiya V.N., Demonis I.M., Orekhov N.G. Directional crystallization of heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007. No. 2. P. 60—70 (In Russ.).
8. Толорайя В.Н., Демонис И.М., Остроухова Г.А. Формирование монокристаллической структуры литых крупногабаритных турбинных лопаток ГТД и ГТУ на установках высокоградиентной направленной кристаллизации. *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 2011. No. 1. С. 25—33.
Toloraiya V.N., Demonis I.M., Ostroukhova G.A. Formation of a single-crystal structure of cast large-size turbine blades for gas turbine engines and gas turbines in high-gradient directional crystallization plants. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2011. No. 1. P. 25—33 (In Russ.).
 9. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н., Тренинков И.А. Высокоградиентная направленная кристаллизация интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al системы Ni—Al—Ta, упрочненного фазой TaC. *Тр. ВИАМ*. 2017. No. 3. URL:http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1074.
Petrushin N.V., Eliutin E.S., Raevskikh A.N., Treninkov I.A. High-gradient directional crystallization of the Ni—Al—Ta intermetallic alloy based on the Ni—Al—Ta system refined with the TaC phase. *Trudy VIAM*. 2017. No. 3. URL:http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1074 (In Russ.).
 10. Klocke F. Technological and economical assessment of alternative process chains for blisk manufacturer original research article. *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 35. P. 67—72.
 11. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии. *Металлообработка*. 2015. No. 4 (88). С. 56—60.
Ageev S.V., Girshov V.L. Hot isostatic pressing in powder metallurgy. *Metalloobrabotka*. 2015. No. 4 (88). P. 56—60 (In Russ.).
 12. Hur S.M., Choi K.H., Lee S.H., Chang P.K. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process. *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 112. P. 236—243.
 13. Yasa E., Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng. Heverlee, Belgium. *Adv. Product. Eng. Manag.* 2011. Vol. 4. P. 259—270. URL: <https://lirias.kuleuven.be> (accessed: 03.09.2018).
 14. Kruth J.-P., Froyen L., Van Vaerenbergh J., Mercelis P., Rombouts M., Lauwers B. Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.* 2004. Vol. 149. P. 616—622.
 15. Felgueroso D., Vijande R., Cuetos J.M., Tucho R., Hernandez A. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behavior of plasma-sprayed Ni-based coatings. *Wear*. 2008. Vol. 264. P. 247—263.
 16. Guozhi X., Jingxian Z., Yijun L., Keyu W., Xiangyin M., Pinghua L. Effect of laser remelting on corrosion behavior of plasma-sprayed Ni-coated WC coatings. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 460—461. P. 351—356.
 17. Grabowski A., Formanek B., Sozanska M. Laser remelting of Al—Fe—TiO₃ composite powder incorporated in an aluminum matrix. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2006. Vol. 18. No. 1—2. P. 95—98.
 18. Rombouts M. Selective Laser Sintering/Melting of iron-based powders: Ph.D. thesis. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2006.
 19. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Добыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: Пос. для инженеров. М.: НАМИ, 2015.
Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additive technologies in mechanical engineering. Moscow: NAMI, 2015 (In Russ.).
 20. Rai G., Lavernia E., Grant N.J. Powder size distribution in ultrasonic gas atomization. *J. Met.* 1985. No. 37 (8). P. 22—29.
 21. Lubanska H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals. *J. Met.* 1970. No. 22 (2). P. 45—49.
 22. Morakotjinda M., Fakpan K., Yotkaew T., Tosangthum N., Krataithong R., Daraphan A., Siriphol P., Wila P., Vattanugul B., Tongsri R. Gas atomization of low melting-point metal powders. *Chiang Mai J. Sci.* 2010. No 37 (1). P. 55—63.
 23. Осокин Е.Н., Артемьева О.А. Процессы порошковой металлургии: Курс лекций. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u_lectures.pdf (дата обращения: 03.09.2018).
Osokin E.N., Artem'eva O.A. Powder metallurgy processes. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u_lectures.pdf (accessed: 03.09.2018) (In Russ.).
 24. Antipas G. Gas atomization of aluminium melts: Comparison of analytical models. *Metals*. 2012. Vol. 2. P. 202—210.
 25. Оглезнева С.А., Сметкин А.А., Митин В.И., Калинин К.В. Влияние параметров атомизации расплава на технологические характеристики порошка марки 12X18H10T. *Вестн. Перм. нац. иссл. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 20. No. 4. С. 34—48.
Oglezneva S.A., Smetkin A.A., Mitin V.I., Kalinin K.V. Influence of melt atomization parameters on technological characteristics of powder 12X18H10T. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2017. Vol. 20. No. 4. P. 34—48 (In Russ.).