

УДК 621.762

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-4-10

**Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования\***

**А. А. Хлыбов**, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Д. А. Рябов**, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**М. С. Аносов**, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Е. С. Беляев**, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*Целью настоящего исследования является изучение особенностей структуры и свойств сплавов, полученных с использованием технологии горячего изостатического прессования металлических порошков. Исследование проводилось в диапазоне температур прерывания цикла горячего изостатического прессования от 670 до 1150 °С на сплавах 08X18H10T и X12MФ. Для обработки изображений микроструктур и оценки их фрактальной размерности разработано программное обеспечение в среде MATLAB. Результаты микроструктурного анализа исследуемых металлов показали, что полное спекание порошков наблюдается при температуре горячего изостатического прессования 1150 °С, при более низких температурах в микроструктуре сплавов наблюдаются поры и неспеченные сферические частицы металлического порошка. Размер зерен сплавов, полученных путем горячего изостатического прессования, определяется прежде всего размерами исходной фракции металлического порошка. По результатам оценки плотности сплавов, полученных при различных температурах горячего изостатического прессования, установлена связь относительной плотности сплава от температуры процесса. По результатам фрактального анализа установлена связь показателя фрактальной размерности микроструктуры сплава с температурой горячего изостатического прессования и относительной плотностью исследуемых металлов. Полученные зависимости имеют линейный характер. Погрешность оценки относительной плотности по полученным зависимостям составляет в среднем 5 %.*

*Полученные в ходе исследования данные дают возможность оценки плотности металлов, полученных способом горячего изостатического прессования металлических порошков, путем оценки фрактальной размерности изображения микроструктуры.*

**Ключевые слова:** горячее изостатическое прессование, порошки сплава X12MФ, порошки сплава 08X18H10T, фрактальная размерность, относительная плотность.

**Введение**

**С**реди наиболее перспективных технологий получения материалов из порошков является горячее изостатическое прессование (ГИП), которое нашло широкое применение в различных областях получения деталей с высокими эксплуатационными свойствами [1, 2]. Это связано с тем, что данная технология позволяет получить высокий уровень свойств материала. Технология ГИП представляет собой

комбинированное воздействие на обрабатываемый материал высоких температур и всестороннего давления. Источником, передающим давление на материал, является, как правило, газ (обычно инертный, например, аргон) [3].

Чаще всего при ГИП применяются распыленные порошки сферической формы различных металлических сплавов, за счет чего можно получать детали сложной конфигурации, а также достигать больших габаритных разме-

© Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Аносов М. С., Беляев Е. С., 2021

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высоко-технологичного производства материалов, изделий и оборудования с использованием аддитивных технологий и технологий газостатирования» на базе ПАО «РУСПОЛИМЕТ» по соглашению № 075-11-2019-084 от 18.12.2019 (Постановление Правительства Российской Федерации № 218 от 09 апреля 2010 г.).

ров изделия. Это позволяет снизить металлоемкость заготовок и число последующих операций механической обработки. Детали, полученные методом ГИП, обладают повышенной усталостной прочностью, высоким сопротивлением коррозии, у них низкий уровень остаточных напряжений, а также увеличенный ресурс работы.

Одной из проблем деталей, изготовленных по технологиям порошковой металлургии, является появление микропор. Микропоры приводят к значительному снижению износостойкости и механических характеристик металла. Применение технологии ГИП позволяет решить эту проблему [4–7], за счет чего происходит увеличение плотности [8], стабилизация структуры и свойств материала. Однако в процессе ГИП при высоких температурах существует возможность роста зерна в поликристалле, что впоследствии может привести к уменьшению кратковременной прочности и усталости. В связи с этим важен выбор оптимальных параметров ГИП (температура, давление, продолжительность), как при обработке литых сплавов [9], так и при работе с порошковыми материалами, в микроструктуре которых не должно наблюдаться большого количества микропор.

#### Химический состав исследуемых сплавов

##### Chemical composition of the investigated alloys

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	W	Fe
08X18H10T	< 0,08	< 0,8	< 2,0	< 0,035	< 0,02	17...19	< 0,3	9...11	< 0,2	< 0,7	< 0,4	< 0,3	ост.
X12MФ	1,45...1,65	0,1...0,4	0,15...0,45	< 0,03	< 0,03	11...12,5	0,4...0,6	< 0,35	0,15...0,3	–	< 0,3	–	≈ 84

В качестве оснастки для изготовления образцов использовали капсулы (полые цилиндры) из стали 20 ГОСТ 1050–2013 цилиндрической формы диаметром 70 мм, длиной 200 мм и толщиной стенки 2 мм. Технологический процесс получения образцов следующий [17]:

- вибрационная засыпка порошка в капсулы;
- дегазация в вакууме;
- нагрев с всесторонним прессованием до температур 670, 700, 750, 800, 900 и 1150 °С по 5 образцов для каждой температуры и выдержка при заданной температуре 30 мин.

Микроструктуру исследуемых образцов получали с помощью металлографического оптического микроскопа KeyenceVHX-1000. Для выявления структурных составляющих сплавов 08X18H10T и X12MФ использовали электрохимическое травление в 10%-м растворе щавелевой кислоты по режиму 5 В, 2 А в течение 30 с.

Для оценки остаточной пористости проводили расчет относительной плотности материала

Одним из методов оценки параметров структуры и контроля пор, кроме классических методик микроструктурного анализа и оценки плотности, может выступать фрактальный анализ. Данный метод в последнее время находит широкое применение в металловедении и описан в трудах В. С. Ивановой, А. Г. Колмакова, Ю. Г. Кабалдина, В. И. Трефилова и др. [10, 11]. Также подходы фрактального анализа в настоящее время все чаще используются для автоматизации нахождения дефектов микроструктуры [12], свойств и характеристик материалов [13–16] на основе анализа микроструктуры и изломов.

**Целью** настоящего исследования является изучение особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования, с использованием фрактального анализа для оценки режимов горячего изостатического прессования.

#### Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследования были выбраны металлы, широко применяемые в машиностроении при эксплуатации в условиях повышенных температур (до 600 °С), – стали 08X18H10T и X12MФ. Химический состав исследуемых сплавов показан в таблице.

( $\theta$ ) как отношение плотности материала после каждого прерванного цикла ГИП к плотности сплава при максимальной исследуемой температуре (1150 °С), при которой плотность заготовок близка к 100 %.

После получения фотографий микроструктур проводилась их предварительная обработка для повышения точности анализа. Для предварительной обработки и оценки фрактальной размерности изображений микроструктур ( $D_f$ ) была разработана программа в среде MATLAB.

Предварительная обработка изображения микроструктуры включала в себя повышение резкости, выравнивание яркости, фильтрацию (в том числе с использованием вейвлет-фильтра) и бинаризацию [18]. Эти режимы являются наиболее эффективными инструментами для обработки изображений микроструктур металлов [19].

Для расчета фрактальной размерности обработанное изображение покрывали прямоугольной сеткой с размером ячейки  $e$  (диапазон вели-

чин ячеек выбирался исходя из среднего диаметра порошковых частиц ( $d$ ) от  $0,005 d-d$ ). После этого подсчитывалось количество ячеек ( $N$ ), содержащих границу (или «пустоту»). Фрактальная размерность определялась по уравнению линии регрессии

$$\log(N) = D_f \cdot \log(1/e) + C,$$

где  $D_f$  – фрактальная размерность;  $C$  – коэффициент линии регрессии.

Фактически при расчете фрактальной размерности ведется учет светлых участков микроструктуры (порошка и зерен материала) и темных участков (пор, границ зерна). Так, если фо-

тография микроструктуры представляет собой зону поры (темный участок), то значение фрактальной размерности будет равно 2, и наоборот, для полностью светлых участков значение фрактальной размерности изображения равно 1. Данная закономерность позволяет говорить о возможности оценки плотности материала путем расчета фрактальной размерности изображения микроструктуры.

#### Анализ результатов экспериментальных исследований

Для различных температур ГИП были получены изображения микроструктур исследуемых сплавов (рис. 1).

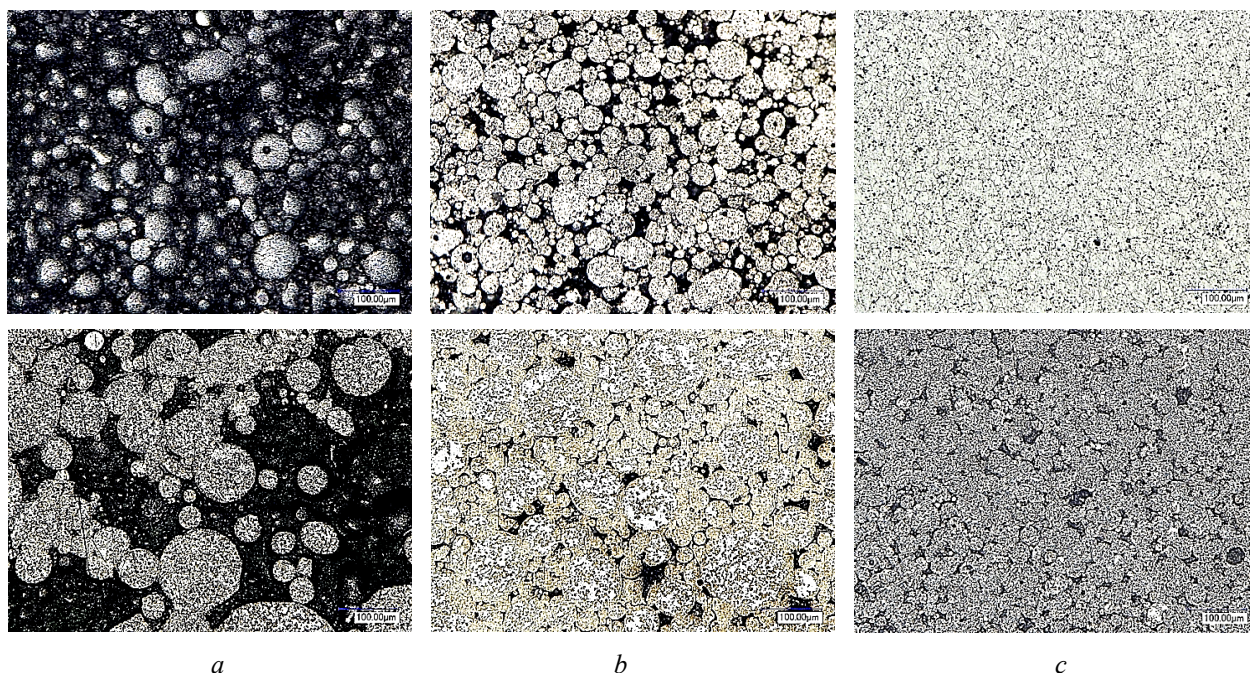


Рис. 1. Микроструктуры сплавов 08X18Ni10Ti (вверху) и X12MoV (внизу) для температур ГИП ( $\times 500$ ):  
a – 700 °C; b – 800 °C; c – 1150 °C

Fig. 1. Microstructures of alloys 08Cr18Ni10Ti (above) and Cr12MoV (from below) for HIP temperatures ( $\times 500$ ):  
a – 700 °C; b – 800 °C; c – 1150 °C

Как видно из результатов микроструктурных исследований, представленных на рисунке 1, при температуре 700 °C в структуре наблюдаются практически не спеченные в результате ГИП частицы порошка. Дальнейшее повышение температуры ГИП выше 800 °C приводит к уменьшению пористости материала и спеканию частиц материала. При 1150 °C наблюдается зеренная структура материала с размером зерна, определяемым исходными размерами частиц.

На рисунке 2 приведены результаты оценки относительной плотности материала, полученного при каждой температуре ГИП.

Полученные зависимости относительной плотности хорошо аппроксимируются полино-

мом второй степени с величиной достоверности аппроксимации не менее  $R^2 = 0,98$  и коррелируют с результатами проведенных ранее исследований для никелевого сплава ВЖ159 [20]. Как видно из зависимости (см. рис. 2), относительная плотность 08X18Ni10Ti ниже во всем диапазоне температур ГИП по сравнению со сплавом X12MoV.

Исходная относительная плотность формируется на стадии вибрационного заполнения капсулы порошком. Используемые для ГИП порошки из-за практически идеальной сферической формы при спекании в вакууме при температурах до 1150 °C после холодного уплотнения практически не имеют усадки. Соответственно, после

вибрационной загрузки порошка в капсуле полученное дисперсное тело будет иметь плотность, аналогичную плотности после утряски. Таким образом, относительная плотность определяется прежде всего размером фракции порошка и исходной плотностью материала.

Для оценки связи относительной плотности исследуемых сплавов с величиной фрактальной размерности микроструктуры проведен фрактальный анализ микроструктур сплавов при исследуемых температурах ГИП.

Полученные зависимости фрактальной размерности микроструктуры от температуры ГИП приведены на рисунке 3. Эти зависимости коррелируют с результатами оценки относительной плотности. Так, чем ниже относительная плотность материала, тем меньше значения фрактальной размерности изображения микроструктуры.

На основе полученных данных (см. рис. 2 и 3) построена зависимость относительного значения фрактальной размерности ( $D_f/D_{f1150}$ ) от относительной плотности (рис. 4). Полученная связь имеет характер, близкий к линейной за-

висимости, а представленные зависимости могут быть описаны следующими соотношениями ( $R^2 = 0,92$ ):

$$\theta = 0,7326D_{f_{\text{отн}}} + 0,2863 \text{ – сталь X12MФ;}$$

$$\theta = 2,127D_{f_{\text{отн}}} - 1,1808 \text{ – сталь 08X18H10T.}$$

$$\text{В свою очередь, } D_{f_{\text{отн}}} = \frac{D_f}{D_{f(t=1150)}},$$

где  $D_f$  – фрактальная размерность микроструктуры сплава при рассматриваемой температуре ГИП;  $D_{f(t=1150)}$  – фрактальная размерность микроструктуры сплава при рассматриваемой температуре ГИП 1150 °С.

$D_{f(t=1150)}$  соответствует фрактальной размерности микроструктуры сплава, полученного при полном его спекании практически без пор, и, как показал анализ, имеет в целом постоянную величину  $D_{f(t=1150)} = 1,87 \pm 0,02$  (08X18H10T) и  $D_{f(t=1150)} = 1,863 \pm 0,012$  (X12MФ).

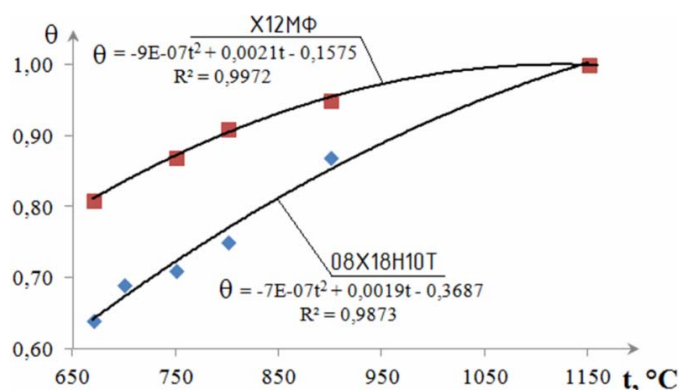


Рис. 2. Зависимости относительной плотности ( $\theta$ ) от температуры ГИП исследуемых сплавов

Fig. 2. Dependences of the relative density ( $\theta$ ) on the HIP temperature of the investigated alloys

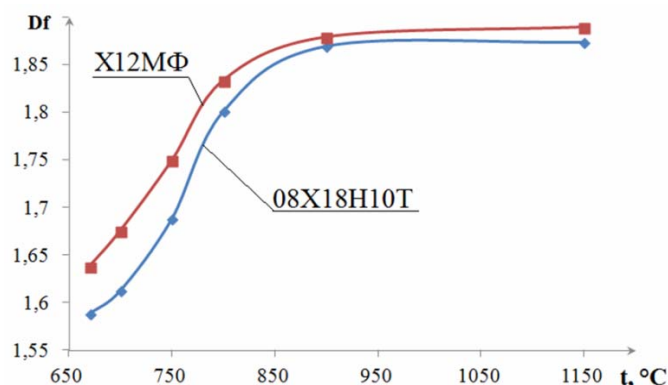


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности от температуры ГИП исследуемых сплавов

Fig. 3. Dependence of the fractal dimension on the HIP temperature of the investigated alloys

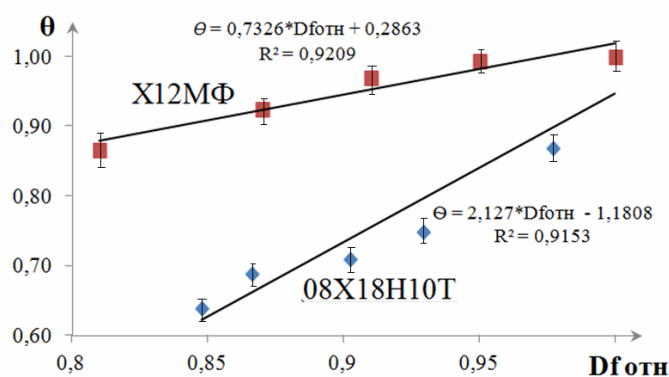


Рис. 4. Зависимости относительной плотности от относительного значения фрактальной размерности микроструктуры сплавов

Fig. 4. Dependences of the relative density on the relative value of the fractal dimension of the microstructure of alloys

Исходя из полученных данных можно получить зависимости для оценки относительной плотности  $\theta$  исследуемых сплавов на основе оценки фрактальной размерности его микроструктуры  $D_f$ :

$$\theta = 0,3918D_f + 0,2863(\pm 0,03) \text{ – сталь X12M}\Phi;$$

$$\theta = 1,1417D_f - 1,1808(\pm 0,04) \text{ – сталь 08X18H10T.}$$

Погрешность оценки относительной плотности по полученным зависимостям составляет в среднем 5 %.

### Выводы

1. Относительная плотность материалов, полученных по технологии ГИП, определяется прежде всего размером фракции порошка и исходной плотностью материала.

2. При увеличении температуры ГИП наблюдается монотонное увеличение плотности исследуемых сплавов; так, при температуре ГИП 1150 °С поры практически не обнаруживаются, и наблюдается зеренная структура сплава с размером зерна, зависящим от исходного размера фракции порошка.

3. Фрактальная размерность изображения микроструктуры имеет определенную связь с плотностью материала. Полученная связь относительной плотности от фрактальной размерности изображения микроструктуры позволяет оценивать плотность материала с достаточно высокой точностью. Погрешность оценки относительной плотности составляет в среднем 5 %.

### Библиографические ссылки

1. Береснев А. Г. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства // Аддитивные технологии. 2017. № 4. С. 44–48.

2. Агеев С. В., Гуршов В. Л. Горячее изостатическое прессование металлических порошков // Металлург. 2015. № 8. С. 18–21.

3. Агеев С. В., Гуршов В. Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлообработка. Новые материалы и технологии производства. 2015. № 4 (88). С. 56–60.

4. Lewandowski J.J. and Seifi M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46, pp. 151-186.

5. Hrabec N. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International J. of Fatigue*, 2017, vol. 94, pp. 202-210.

6. Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после горячего изостатического прессования / П. Д. Жеманюк, В. В. Ключихин, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик // Вестник двигателестроения. 2015. № 1. С. 139–145.

7. Процессы изостатического прессования : пер. с англ. / под ред. И. И. Папирова, Я. Д. Пахомова. М. : Металлургия, 1990. 193 с.

8. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионностойкой стали / Д. И. Сухов, П. Б. Мазалов, С. В. Неруш, Н. А. Ходырев // Труды ВИАМ. 2017. № 8 (56). С. 34–44.

9. Белов Н. А., Белов В. Д. Влияние температуры горячего изостатического прессования отливок сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl на фазовый состав и структуру // Известия вузов. ПМ и ФП. 2013. № 3. С. 49–53.

10. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 709, 033076, IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076.

11. Kim V.A., Mokritskii B.Y., Morozova A.V. Multi-fractal analysis of microstructures after laser treatment of steels. *Solid state phenomena*, 2020, vol. 299SSP, pp. 926-932.

12. Шумарова О. С., Корнилова Н. В. Автоматизация нахождения дефектов на основе фрактального анализа // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 4 (44). С. 37–44.

13. Штофель О. А., Рабкина М. Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей // Universum: технические науки. 2016. № 10 (31). С. 24–27.

14. Савенков Г. Г., Барахтин Б. К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 6. С. 177–184.

15. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин [и др.]. М.: Наука, 1994. 384 с.

16. Кузнецов П. В., Петракова И. В., Шрайбер Ю. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № спец 1. С. 389–392.

17. Влияние технологии горячего изостатического прессования на структуру и свойства изделий из порошка жаропрочного сплава ВЖ159 / А. А., Хлыбов, Е. С. Беляев, А. Д. Рябцев, С. С. Беляева, Ю. А. Гетмановский, П. М. Явтушенко // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. № 1 (19). С. 44–48.

18. Ким В. А., Башков О. В., Попкова А. А. Исследование структурных изменений при пластической деформации стали 20 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 82(1). С. 32–36.

19. Цифровая обработка изображений металлографических микроструктур в среде MATLAB. Методика / В. Н. Гадалов, О. В. Башков, И. В. Ворначева, А. В. Филонович // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2015. № 12 (21). С. 43–46.

20. Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159 / А. А. Хлыбов, Е. С. Беляев, А. Д. Рябцев, С. С. Беляева, Ю. А. Гетмановский, П. М. Явтушенко, Д. А. Рябов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19, № 3. С. 75–83. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>.

## References

1. Beresnev A.G. [Hot isostatic pressing for additive production]. *Additivnyye tekhnologii*, 2017, vol. 4, pp. 44–48 (in Russ.).

2. Ageyev S.V., Girshov V.L. [Hot isostatic pressing of metal powders]. *Metallurg*, 2015, vol. 8, pp. 18–21 (in Russ.).

3. Ageyev S.V., Girshov V.L. [Hot isostatic pressing in powder metallurgy]. *Metallrobootka. Novyye materialy i tekhnologii proizvodstva*, 2015, vol. 4, pp. 56–60 (in Russ.).

4. Lewandowski J.J. and Seifi M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46, pp. 151–186.

5. Hrabe N. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting

(EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International J. of Fatigue*, 2017, vol. 94, pp. 202–210.

6. Zhemanyuk P.D., Klochikhin V.V., Lysenko N.A., Naumik V.V. [Structure and properties of cast blades of aircraft engines made of heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing]. *Vestnik dvigatelstroyeniya*, 2015, vol. 1, pp. 139–145 (in Russ.).

7. Papirova I.I., Pakhomova Ya.D. (eds.). *Protsessy izostaticheskogo pressovaniya* [Isostatic pressing processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 193 p. (in Russ.).

8. Sukhov D.I., Mazalov P.B., Nerush S.V., Khodyrev N.A. *Vliyaniye parametrov selektivnogo lazernogo splavleniya na obrazovaniye poristosti v sintezirovanom materiale korrozionnostoykoy stali* [Influence of the parameters of selective laser alloying on the formation of porosity in the synthesized material of corrosion-resistant steel]. *Trudy VIAM*, 2017, vol. 8, pp. 34–44 (in Russ.).

9. Belov N.A., Belov V.D. [Influence of the temperature of hot isostatic pressing of castings of alloys based on  $\gamma$ -TiAl on the phase composition and structure]. *Izvestiya vuzov, PM i FP*, 2013, vol. 3, pp. 49–53 (in Russ.).

10. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 709, 033076. doi: 10.1088/1757-899X/709/3/033076.

11. Kim V.A., Mokritskii B.Y., Morozova A.V. Multifractal analysis of microstructures after laser treatment of steels. *Solid state phenomena*, 2020, vol. 299SSP, pp. 926–932.

12. Shumarova O.S., Kornilova N.V. [Automation of finding defects based on fractal analysis]. *Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki*, 2017, vol. 4, pp 37–44 (in Russ.).

13. Shtofel' O.A., Rabkina M.D. [Using multifractal analysis to assess the properties of structural steels]. *Universum: tekhnicheskiye nauki: elektron. nauchn. Zhurn*, 2016, vol. 10, pp 24–27 (in Russ.).

14. Savenkov G.G., Barakhtin B.K. [Communication of fractal dimension of the surface of destruction with a complex of standard characteristics of material in tension]. *PMTF*, 2011, vol. 52, pp. 177–184 (in Russ.).

15. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh. [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 384 p. (in Russ.).

16. Kuznetsov P.V., Petrakova I.V., Shrayber Yu. [Fractal dimension as a characteristic of fatigue of metal polycrystals]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2004, vol. 7, no. 1, p. 389–392 (in Russ.).

17. Khlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabtsev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovskii Yu.A., Yavtushenko P.M. Vliyanie tekhnologii goryachego izostaticheskogo pressovaniya na strukturu i svoystva izdelii iz poroshka zharoprochnogo splava VZH159. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2021, no. 1, pp. 44–48 (in Russ.).

18. Kim V.A., Bashkov O.V., Popkova A.A. [Study of the Structural Changes upon Plastic Strain of Steel

20]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2016, 82, pp 32-36 (in Russ.).

19. Gadalov V.N., Bashkov O.V., Vornacheva I.V., Filonovich A.V. [Digital image processing of metallographic microstructures in MATLAB environment. Methodology]. *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh (YESU)*, 2015, vol. 12, pp. 43-46 (in Russ.).

20. Khlybov A.A., Belyayev Ye.S., Ryabtsev A.D., Belyayeva S.S., Getmanovskiy Yu.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A. [Influence of HIP technology on the structure and properties of VZh 159 nickel alloy]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2021, vol. 19, pp. 75-83 (in Russ.). doi: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83.

### Study of Microstructure Features and Properties of Metals Obtained by Hot Isostatic Pressing

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Anosov, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

E.S. Belyaev, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*The aim of this research is to study the features of the structure and properties of alloys obtained using the technology of hot isostatic pressing (HIP) of metal powders. The study was carried out in the temperature range of interruption of the HIP cycle from 670 to 1150 °C on alloys 08Cr18Ni10Ti and Cr12MoV. For processing images of microstructures and assessing their fractal dimension, software has been developed in the MATLAB environment. The results of microstructural analysis of the metals under study showed that complete sintering of powders is observed at a HIP temperature of 1150 °C; at lower temperatures, pores and unsintered spherical particles of metal powder are observed in the microstructure of the alloys. The grain size of alloys obtained by HIP is determined, first of all, by the size of the initial fraction of the metal powder. Based on the results of evaluating the density of alloys obtained at different temperatures of the HIP, a relationship was established between the relative density of the alloy and the process temperature. Based on the results of fractal analysis, the relationship between the fractal dimensionality of the microstructure of the alloy and the HIP temperature and the relative density of the metals under study has been established. The obtained dependences are linear. The error in estimating the relative density from the obtained dependencies is, on average, 5 %.*

*The data obtained in the course of the study make it possible to estimate the density of metals obtained by hot isostatic pressing of metal powders by evaluating the fractal dimension of the microstructure image.*

**Keywords:** hot isostatic pressing, Cr12MoV, 08Cr18Ni10Ti, fractal dimension, relative density.

Получено 20.09.2021

#### Образец цитирования

Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования / А. А. Хлыбов, Д. А. Рыбов, М. С. Аносов, Е. С. Беляев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 4–10. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-4-10.

#### For Citation

Khlybov A.A., Ryabov D.A., Anosov M.S., Belyaev E.S. [Study of Microstructure Features and Properties of Metals Obtained by Hot Isostatic Pressing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 4-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-4-10.