Датчик внутреннего контроля с высоким разрешением позволяет распознать мельчайшие дефекты в зонах, к которым сложно или невозможно получить доступ для визуального контроля, например на внутренних поверхностях отверстий. Наряду с объективной классификацией дефектов достигается максимальное распознавание дефектов на цилиндрических отверстиях.

Роботизированный модуль контроля поверхности отличается высокой универсальностью благодаря легкому переоснащению. Для контроля новых или измененных типов деталей требуется лишь настроить программное обеспечение системы контроля и перепрограммировать робота. Даже для небольших партий изделий можно провести эффективную и полностью автоматическую проверку. Система контроля встраивается в действующую производственную линию.

1. Технический справочник Sandvic Coromant: рекомендации по обработке сверлением, 2006.
2. Технологическое обеспечение процессов глубокого сверления Botek., "Werkstattechnik und Maschinenbau", 2007.
3. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сусллова, А.Г. Косиловой, Р.М. Мещерякова. 5-е изд. перераб. и доп. Т. 2 М.: Машиностроение – 1, 2001 944 с.
4. Черпаков Б. И. Металлорежущие станки: Учеб. пособие / Б. И. Черпаков, Т. А. Альперович. – М.: Изд-во «Академия», 2003 368 с.

Хлыбов А.А., Аносов М.С., Рябов Д.А.

Фрактальный анализ микроструктур сплавов, полученных путем горячего изостатического прессования

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/trnio-10-2021-60

Аннотация

В исследовании представлены результаты анализа микроструктур сплавов, полученных путем горячего изостатического прессования (ГИП) металлических порошков. Установлена связь относительной плотности сплавов Inko 718 и ЭП741 от температуры ГИП. Показана связь фрактальной размерности изображения микроструктуры с относительной плотностью исследуемых сплавов. Полученные зависимости позволяют оценивать плотность полученных сплавов при различных температурах ГИП.

Ключевые слова: горячее изостатическое прессование, Inko 718, ЭП741, фрактальная размерность, относительная плотность.

Abstract

The study presents the results of analysis of the microstructures of alloys obtained by hot isostatic pressing (HIP) (metal powders). The relationship between the relative density of the Inko 718 and EP741 alloys on the HIP temperature is shown. alloys at different HIP temperatures.

Keywords: hot isostatic pressing, Inko 718, EP741, fractal dimension, relative density.

В настоящее время горячее изостатическое прессование (ГИП) является одной из наиболее перспективных технологий получения почти готовых изделий сложной формы из металлических порошков. С использованием данной технологии можно добиться высоких эксплуатационных показателей материала деталей за счет особенности самого процесса. К таким особенностям относятся высокие температуры, обеспечивающие хорошую спекаемость сплавов и всесторонние давления, уменьшающие их пористость.

Как показывают исследования, 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, что приводит к значительному снижению износостойкости и

механических характеристик металла. Применение технологии ГИП, позволяет решить эту проблему [1–2], за счет чего происходит увеличение плотности [3], стабилизация структуры и свойств материала. Однако, несмотря на это, при отработке режимов ГИП необходим контроль структуры металлов при различных температурах процесса.

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 ряда исследователей [4,5].

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали сплавы, широко применяемые в порошковой металлургии для получения изделий, работающих в условиях повышенных температур за счет высокого содержания в них никеля, а именно сплавы Inko 718 и ЭП741.

Для исследования микроструктур сплавов при различных температурах ГИП (680, 720, 780, 800, 850, 900, 950 и 1050°C), было изготовлено по 5 образцов для каждой температуры. Исследование микроструктур сплавов производили с помощью цифрового микроскопа Keyence VHX-1000.

Для каждой их температур на основе анализа плотности сплавов оценивалась относительная плотность материала (θ) по зависимости:

$$\theta = \frac{\rho_{\text{тек}}}{\rho_{(t=1150)}},$$

где $\rho_{\text{тек}}$ – плотность материала после прерванного цикла ГИП при исследуемой температуре, $\rho_{(t=1150)}$ – плотность сплава при температуре 1050°C, при которой плотность заготовок близка к 100%.

После получения фотографий микроструктур проводилась их предварительная обработка по алгоритму, описанному в работе [4]. Для предварительной обработки и оценки фрактальной размерности изображений микроструктур (D_f) была разработана и апробирована на большом количестве сплавов программа в среде MATLAB.

Для расчета фрактальной размерности обработанное изображение покрывали прямоугольной сеткой с размером ячейки – e . После этого подсчитывали количество ячеек (N) содержащих границу (или «пустоту»). Фрактальная размерность определялась как угловой коэффициент полученной по результатам построения линии регрессии.

Экспериментальные данные. Анализ результатов эксперимента.

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

Рисунок 1. Микроструктуры сплавов Inko 718 (сверху) и ЭП741 (снизу) (x500) после температур ГИП: а) 800°C; б) 1050°C

Как видно из результатов микроструктурных исследований (рис. 1) при температуре 800°C в структуре наблюдаются, практически не спеченные частицы порошка в результате

ГИП. Дальнейшее повышение температуры ГИП приводит к уменьшению пористости материала и спеканию частиц материала, так при 1050°C наблюдается зеренная структура материала.

На рис. 2 приведены результаты оценки относительной плотности материала, полученного при каждой температуре прерванного цикла ГИП.

Рисунок 2. Зависимости относительной плотности (θ) от температуры ГИП исследуемых сплавов

Зависимости относительной плотности (рис. 2) хорошо аппроксимируются линейной зависимостью с величиной достоверности аппроксимации не менее $R^2=0.98$, при этом данные зависимости описываются следующим образом:

$$\theta = 0,0011t - 0,2074 \text{ – сплав ЭП741}$$

$$\theta = 0,0008t + 0,1676 \text{ – сплав Inko 718}$$

Как видно из зависимостей рис. 2 относительная плотность ЭП741 ниже во всем диапазоне температур ГИП по сравнению со сплавом Inko 718.

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

Зависимости относительной плотности сплавов от величины фрактальной размерности изображения микроструктуры показаны на рис. 3.

Рисунок 3. Зависимости относительной плотности (θ) от величины фрактальной размерности изображения микроструктуры сплавов

Полученные результаты позволяют прийти к следующим выводам.

1. При увеличении температуры ГИП наблюдается монотонное увеличение плотности исследуемых сплавов. При температуре ГИП 1050°C поры практически не обнаруживаются и наблюдается зеренная структура сплавов.
2. Фрактальная размерность изображения микроструктуры сплавов имеет определенную связь с плотностью материала, полученного путем ГИП, что

позволяет проводить оценку плотности сплава на основе фрактального анализа полученных микроструктур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного 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 от 09 апреля 2010 года № 218).

1. Агеев, С.В. Горячее изостатическое прессование металлических порошков / С. В. Агеев, В. Л. Гиршов // *Металлург*, 2015. № 8. с. 18-21;
2. Процессы изостатического прессования. Под редакцией И.И. Папирова, Я.Д. Пахомова. М: *Металлургия*, 1990, 193 с.
3. Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159 / Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А. // *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>
4. 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. / Y.G. Kabaldin, M. S. Anosov, D. A. Shatagin // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. - 709 (2020) 033076 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076.
5. Шумарова О. С., Корнилова Н. В. Автоматизация нахождения дефектов на основе фрактального анализа // *Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. №4 (44).