УДК 621.762; 621.74

Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАПСУЛ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ*

Аннотация. *Технология горячего изостатического прессования считается одним из прогрессивных современных методов производства заготовок и изделий из металлических порошков. Эта технология наиболее широко применяется для производства плотных, беспористых изделий из металлических порошков, а также для уплотнения фасонных отливок, например из титановых сплавов. При этом микроструктура прессованных изделий из распыленных металлических порошков отличается особо высокой дисперсностью и однородностью, а прессованный материал – повышенной прочностью и вязкостью. Характерной особенностью технологии является использование формообразующей оснастки – капсулы, меняющей свою геометрию в условиях баротермического воздействия, к которой предъявляется целый ряд достаточно жестких требований. В структуре такой капсулы принято различать два элемента – оболочку, или собственно капсулу, и закладные элементы, которые оформляют сложные внешние и внутренние поверхности будущего изделия и удаляются на завершающих этапах технологического процесса. В статье затрагиваются вопросы выбора материалов и методов изготовления конструктивных элементов капсул горячего изостатического прессования металлических порошков в контексте выявленных недостатков, опасностей и рисков существующего процесса, определяются условия и намечаются мероприятия по их снижению и исключению.*

Ключевые слова: *горячее изостатическое прессование, капсула, металлический порошок, конструктивный элемент, закладной элемент.*

Введение

Технология горячего изостатического прессования (ГИП) известна с середины XX века благодаря учёным и инженерам США и Швеции. Основная идея процесса ГИП заключается в том, что всесторонне равномерное высокое давление, оказываемое в условиях высоких температур на меняющую свою геометрию технологическую оснастку (капсулу) с металлическим порошком, позволяет обеспечить 100%-ю плотность материала и изотропность его свойств во всём объёме получаемого изделия.

В настоящее время наиболее широко ГИП применяется для производства плотных, беспористых изделий из металлических порошков, а также для уплотнения фасонных отливок, например из титановых сплавов. Важно отметить, что микроструктура прессованных изделий из распыленных металлических порошков отличается особо высокой дисперсностью и однородностью, а прессованный материал – повышенной прочностью и вязкостью [1-3].

Технологический процесс ГИП состоит из следующих основных этапов (рис. 1) [4, 5]:

1) проектирование и изготовление герметичной капсулы;

2) заполнение капсулы металлическим порошком (для увеличения плотности заполнения полостей капсул применяют вибрацию);

3) герметизация заполненных металлическим порошком капсул путём откачки воздуха из её полости через специальные трубки и заварка последних; после герметизации капсула подвергается проверке на герметичность (чаще всего погружением в воду);

4) изостатическое прессование заполненных герметичных капсул в газостате при высоких давлении и температуре;

5) удаление капсулы (механическая обработка или химическое травление);

6) финишная обработка полученного изделия (если это необходимо).

Рабочий диапазон температур ГИП находится в пределах от 800 до 2500°С при давлениях от 100 до 200 и более МПа. При этом достигаемая максимальная температура должна быть ниже температуры плавления обрабатываемого металлического порошка приблизительно на 20% для предотвращения образования жидкой фазы – это обеспечивает минимизацию ликвации химических элементов.

В общем случае в составе конструкции капсулы ГИП как формообразующей деформируемой технологической оснастки различают два элемента – оболочку, или собственно капсулу, и закладные элементы, которые оформляют сложные внешние и внутренние поверхности будущего изделия и удаляются на завершающих этапах технологического процесса ГИП (рис. 2).

Как показано на рис. 2, капсула для ГИП состоит из следующих основных частей: наполнительный патрубок *1*, через который происходит заполнение капсулы металлическим порошком; верхняя *2* и нижняя *5* крышки; закладной элемент *4*, который формирует в будущем изделии фасонную поверхность; трубка-прокладка 6 (рис. 2, б), которая предназначена для прижимания закладного элемента ко дну капсулы и фиксации его между верхней и нижней крышками, а также с её помощью можно регулировать толщину стенки получаемого изделия. На рис. 2, в показан вариант, когда закладной элемент выполняет функцию нижней крышки. Закладные элементы также могут крепиться к стенке капсулы путём сварки [6].

© Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М., 2020

* *Работа выполнялась 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).*

Анализ
конструкторского чертежа изделия
(определение особенностей геометрии изделия, конструкции капсулы и рациональности использования закладных элементов)

↓

Обоснование и назначение материалов
для изготовления капсулы и изделия
(основным критерием для выбора этих материалов является минимальность их взаимной активности)

↓

Проектирование капсулы
(расчёт размеров капсулы и определение количества её сварных частей; в случае применения закладных элементов – определение их геометрии, технологии изготовления и способа крепления в полости капсулы)

↓

Изготовление капсулы
(раскрой листового металла, гибка полученных заготовок и их сварка, установка и закрепление закладных элементов в полости капсулы и её окончательная сборка и сварка)

↓

Заполнение капсулы металлическим порошком
(для повышения плотности заполнения объёма капсулы применяется вибрация)

↓

Герметизация заполненной капсулы
(вакуумирование заполненной капсулы и заделка каналов для заполнения её рабочей полости;
проверка капсулы на герметичность – чаще всего путём погружения в резервуар с водой)

↓

Горячее изостатическое прессование
заполненной герметичной капсулы
(плавное повышение давления и температуры до заданных значений, выдержка и плавное понижение давления и температуры)

↓

Удаление капсулы
(механическая обработка или химическое травление)

↓

Финишная обработка изделия
(при необходимости проводится механическая обработка)

Рис. 1. Последовательность основных этапов технологического процесса ГИП

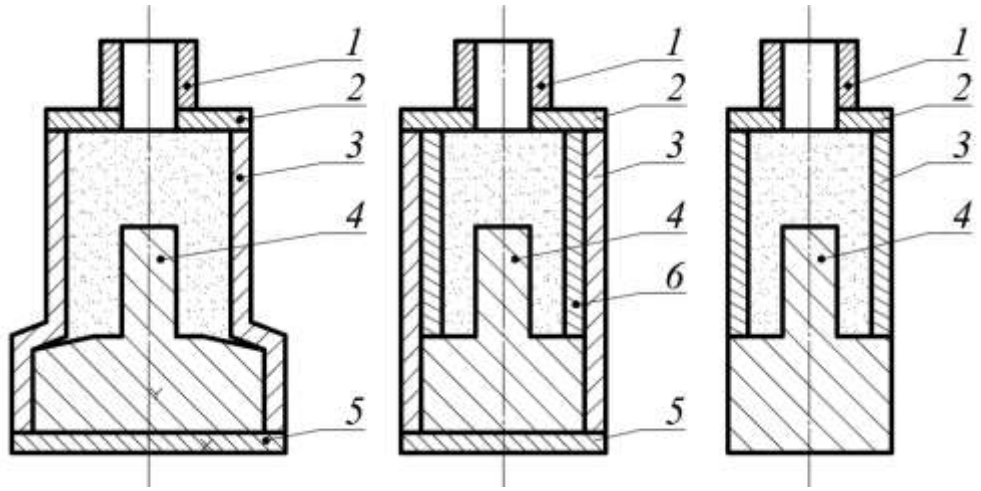


Рис. 2. Принципиальная схема капсулы и варианты способов крепления закладных элементов:
1 – наполнительный патрубок; 2 – крышка капсулы; 3 – боковая стенка (фасонная) капсулы;
4 – закладной элемент; 5 – нижняя крышка капсулы; 6 – трубка-прокладка

Технология ГИП позволяет получить:

1) высокие физико-механические свойства изделий (плотность, структура, химический состав);

2) изделия со сложной геометрией, не требующих больших объёмов механической обработки;

3) малые потери обрабатываемого материала;

4) возможность получения составных конструкций, в том числе и из нескольких материалов;

5) относительная простота конструкции оснастки;

6) возможность исправления внутренних дефектов (например, дефектов литья) и др.

Однако для этого каждый этап технологического процесса ГИП должен сопровождаться жёстким контролем размеров конструктивных элементов капсулы, точности и надёжности установки и крепления закладных элементов, качества выполнения подготовительных операций (плотность заполнения и герметичность), термовременного режима процесса изостатирования и завершающих технологических операций (полнота удаления капсулы и закладных элементов и качество механической обработки).

В этой связи особенно актуальной становится проблема выбора материала и способа изготовления конструктивных элементов капсул ГИП.

Существующие варианты решения

Капсулы

Несколько десятилетий успешного применения ГИП сформировали стереотипное мнение о том, что главным требованием к материалу капсул наряду с доступностью по цене является его хорошая свариваемость. Именно поэтому в 100% случаев капсулы ГИП в промышленных масштабах изготавливают из низкоуглеродистой листовой стали последовательными раскроем, гибкой и сваркой.

В центре внимания при этом традиционно находится качество сварных швов, которые должны выдерживать пиковые нагрузки баротермической обработки в течение достаточно длительных временных интервалов, достигающих нескольких часов. Кроме этого значение имеет обрабатываемость материала, обусловленная необходимостью удаления оболочки механической обработкой.

Закладные элементы капсул

К материалу закладных элементов ГИП предъявляют целую линейку требований: по низкой стоимости, технологичности, низкому сопротивлению деформации в рабочем диапазоне ГИП, близости значений коэффициентов линейного термического расширения с обрабатываемым материалом металлического порошка, возможности удаления травлением, совместимости с обрабатываемым материалом, проявляющейся в минимизации толщины переходного диффузионного слоя, неизбежно образующегося в ходе ГИП.

Обычно для ГИП никелевых, титановых и стальных металлических порошков в качестве материала закладных элементов капсул применяют малоуглеродистые стали. Такие закладные элементы возможно изготавливать специальными способами литья, обеспечивающими высокую геометрическую точность (литье по выплавляемым и/или выжигаемым моделям) или механической обработкой. Они позволяют оформлять внутренние полости в деталях при ГИП в интервале температур 800-1300°С и хорошо удаляются травлением в растворе азотной, соляной и других кислот. Это обстоятельство, кроме снижения объёма механической обработки, позволяет получать изделия со сложным профилем с частично или полностью не обрабатываемыми поверхностями [7]. Известен также опыт использования в качестве материала закладных элементов оксидной керамики [8].

Недостатки, опасности и риски

1. Недостаточный уровень качества сварных швов может привести к негативным последствиям. При наличии даже самых мельчайших несплошностей и пор в сварных швах капсулы в нее под высоким давлением проникает газ (аргон не растворяется в металле), что является причиной газовой пористости и брака изделий. При этом на завершающей стадии цикла газостатирования давление в цилиндре газостата снижается быстрее, чем внутри капсулы, и нарастающая разность давлений в капсуле и газостате может вызвать эффект «раздувания», а иногда и взрыва капсулы.

2. Высокая трудоемкость операций изготовления закладных элементов капсул ГИП механической обработкой металлических заготовок, а также длительность операций и тяжелые условия труда персонала при их удалении травлением в кислоте негативно влияют на технико-экономические и экологические показатели процесса в целом.

Перспективные варианты решения

Сравнение механических характеристик материала ряда марок низкоуглеродистой стали в литом и катаном состоянии после рекомендуемой термической обработки позволяет допустить в ограниченном диапазоне толщин стенок возможность использования цельнолитых капсул ГИП, полученных специальными способами, такими как литье по выплавляемым и/или выжигаемым моделям [9].

Проведенные авторами статьи патентный поиск и информационный обзор состояния вопроса показали наличие ряда предпосылок для изготовления закладных элементов капсул ГИП помимо уже упомянутых специальных способов литья и другими методами, как, например, литье вспененных металлических сплавов и интерметаллидных композиций, некоторые аддитивные технологии (например, *SLS*-процесс селективного лазерного спекания), а также формообразование из неорганических солесодержащих водорастворимых материалов [10]. Основные из этих предпосылок – соответствие перечисленных перспективных материалов и методов изготовления капсул ГИП требованиям, описанным выше, и, как следствие, ожидаемое снижение зависимости результатов процесса от качества сварных швов капсул ГИП,

уменьшение трудоемкости операций изготовления конструктивных элементов капсул, а также улучшение условий труда производственного персонала за счет исключения их удаления травлением в агрессивных средах. Условиями реализации перечисленных перспективных вариантов решения проблемы представляются заинтересованность и наличие профильных производственных мощностей на базовом предприятии и/или его партнерах.

Заключение

Намечены мероприятия и определены условия для обеспечения стабильности ГИП, снижения недостатков существующего технологического процесса и рисков получения производственного брака изделий. Они связаны с изготовлением конструктивных элементов капсул ГИП современными методами точного литья, аддитивными технологиями и привлечением материалов с особыми свойствами, таких как металлические и интерметаллидные пены, а также неорганические солесодержащие водорастворимые композиции. Их исследованиями активно занимается рабочая группа специалистов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и ПАО «РУСПОЛИМЕТ».

Список литературы

1. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлобработка. 2015. №4(88). С. 56-60.
2. Галстян Л.З. Получение высококачественных порошковых композиционных материалов методами порошковой металлургии // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недроиспользование. 2018. №2. С. 54-62.
3. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности моделирования процесса получения гранул методом PREP // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. №1 (214). С. 123-129.
4. Джеймс П. Дж. Процессы изостатического прессования: пер. с англ. / под ред. И.И. Папирова, Я.Д. Пахомова. М.: Металлургия, 1990. 192 с.
5. Einführung in die PM/HIP-Technologie/ Ein Leitfaden für Anwender und Konstrukteure. URL: http://www.epma.com (дата обращения: 27.05.2020).
6. Способ изготовления профильных дисков методом горячего изостатического прессования: пат. 2649188 Рос. Федерация. №2016118312; заявл. 11.05.2016; опубл. 16.11.2017, Бюл. №32.
7. Maanonen M. Steel Pickling in Challenging Conditions: monograph. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2014. 40 p.
8. Способ изготовления форсунки для топливного клапана в дизельном двигателе и форсунка: пат. 2313422 Рос. Федерация. №2005114359/02; заявл. 03.10.2003; опубл. 27.12.2007, Бюл. №36.
9. Шуляк В.С. Литьё по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
10. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: СПбГУ, 2013. 221 с.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: igoleu@mail.ru.

Романов Антон Сергеевич – заведующий лабораториями кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: romanoffas@yandex.ru.

Леушина Любовь Игоревна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395. E-mail: kafmto@mail.ru.

Явтушенко Павел Михайлович – аспирант, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия. Тел.: 8(831) 4364395.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CONSTRUCTION ELEMENTS OF CAPSULES FOR HOT ISOSTATIC PRESSURE OF METAL POWDERS: MODERN TRENDS

Leushin I.O. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: igoleu@mail.ru.

Romanof A.S. – Head of laboratories of the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: romanoffas@yandex.ru.

Leushina L.I. – Ph. D (Eng.), Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: kafmto@mail.ru.

Yavtushenko P.M. – Postgraduate Student, Nizhniy Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia. Tel.: 8(831) 4364395. E-mail: p.yavtushenko@ruspolymet.ru.

Abstract. *Hot isostatic pressing technology is considered one of the most progressive modern methods for the production of billets and products from metal powders. This technology is most widely used for the production of dense, non-porous products from metal powders, as well as for the densification of shaped castings, for example, from titanium alloys. At the same time, the microstructure of pressed products made of atomized metal powders is distinguished by a particularly high dispersion and uniformity, and the pressed material - by increased strength and toughness. A characteristic feature of the technology is the use of a form-building tooling - a capsule that changes its geometry under barothermal action, to which a number of rather stringent requirements are imposed. In the structure of such a capsule, it is customary to distinguish between two elements - the shell, or the capsule itself, and the embedded elements that shape the complex external and internal surfaces of the future product and are removed at the final stages of the technological process. The article deals with the selection of materials and methods for manufacturing structural elements of capsules for hot isostatic pressing of metal powders in the context of the identified shortcomings, hazards and risks of the existing process, determines the conditions and outlines measures to reduce and eliminate them.*

Keywords: *hot isostatic pressure, capsule, metal powder, structural element, embedded element.*

Ссылка на статью:
Леушин И.О., Романов А.С., Леушина Л.И., Явтушенко П.М. Конструктивные элементы капсул горячего изостатического прессования металлических порошков: современные тренды // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 26-30.
Leushin I.O., Romanof A.S., Leushina L.I., Yavtushenko P.M. Construction elements of capsules for hot isostatic pressure of metal powders: modern trends. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva.* [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 26-30.