

Научная статья

УДК 621.762

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-32-45

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЗАПОЛНЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ КАПСУЛ В МЕТАЛЛУРГИИ ГРАНУЛ. АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

А.Е. Князев<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>, А.В. Логунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Обсуждены вопросы изготовления капсул большого наружного диаметра типа «кольцо» с соотношением диаметра и высоты более 8 и массивных крупногабаритных капсул диаметром до 1000 мм для последующего изготовления заготовок дисков методом горячего изостатического прессования. Рассмотрены особенности заполнения капсул гранулами в горизонтальном положении. Проведен анализ формоизменения компактных заготовок после горячего изостатического прессования, рассчитаны коэффициенты усадки. Рассмотрены факторы, влияющие на формоизменение компактных заготовок и коэффициенты усадки.

**Ключевые слова:** капсула, дегазация, герметизация, гранулы, компактирование, горячее изостатическое прессование, гранульная металлургия, формоизменение, плотность утряски, горизонтальное заполнение, фракционный состав, порошок, сегрегация, плотность

**Для цитирования:** Князев А.Е., Мин П.Г., Логунов А.В. Особенности изготовления и заполнения крупногабаритных и кольцевых капсул в металлургии гранул. Анализ формоизменения после горячего изостатического прессования // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 32–45. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-32-45.

Scientific article

## FEATURES OF MANUFACTURING AND FILLING LARGE-SIZED AND RING-SHAPED CAPSULES IN GRANULE METALLURGY. ANALYSIS OF SHAPE CHANGE AFTER HOT ISOSTATIC PRESSING

A.E. Knyazev<sup>1</sup>, P.G. Min<sup>1</sup>, A.V. Logunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article discusses the production of large-diameter «ring» capsules with a diameter-to-height ratio of more than 8 and massive large-diameter capsules with a diameter of up to 1000 mm for subsequent production of disk blanks by hot isostatic pressing. The features of filling the capsules with granules in a horizontal position are considered. The shape change of compact blanks after hot isostatic pressing is analyzed and shrinkage coefficients are calculated. The factors that affect the shape change of compact disk blanks and the shrinkage coefficients are examined.

**Keywords:** capsule, degassing, sealing, granules, compacting, hot isostatic pressing, granule metallurgy, shaping, filling density, horizontal filling, size composition, powder, segregation, density

*For citation:* Knyazev A.E., Min P.G., Logunov A.V. Features of manufacturing and filling large-sized and ring-shaped capsules in granule metallurgy. Analysis of shape change after hot isostatic pressing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 32–45. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-32-45.

### Введение

Одно из главных направлений авиастроения – изучение и разработка новых материалов и технологий изготовления продукции из них. Это определяет перспективы развития современной авиационной промышленности в России [1–5].

Металлургия гранул (гранульная металлургия) – направление порошковой металлургии, которое позволяет изготавливать заготовки дисков турбин высокого и низкого давления с однородной структурой из сложнолегированных жаропрочных никелевых дисковых сплавов, которые невозможно обработать традиционными методами обработки металлов давлением. Под руководством таких выдающихся ученых и практиков, как академик А.Ф. Белов, чл.-корр. АН СССР, д.т.н. В.И. Добаткин, д.т.н. Н.Ф. Аношкин, д.т.н. Г.С. Гарибов и др., это направление достигло значительных успехов в изготовлении гранульных дисков для гражданских и военных двигателей, а также для применения в энергетике. Уже во второй половине 1980-х гг. по данной технологии только в ВИЛС изготавливали до 3000 заготовок дисков в год для военных и гражданских двигателей.

В цепи технологических операций по превращению гранул жаропрочных никелевых сплавов в компактное изделие сложной геометрической формы ответственными этапами являются дегазация гранул, засыпка капсул гранулами и последующая герметизация капсул.

Ведущие предприятия, занимающиеся изготовлением деталей методом гранульной металлургии, не дают подробной информации о способах, применяемых технологических решениях и проблемах, возникающих при дегазации, засыпке и герметизации. Более того, эта информация тщательно скрывается, являясь предметом «know how» [6].

В СССР была создана уникальная установка заполнения и герметизации капсул типа УЗГК [7], позволяющая последовательно проводить следующие технологические операции: дегазацию гранул в летящем потоке, заполнение стальной капсулы гранулами, их виброуплотнение в капсуле и затем герметизацию заполненной капсулы с использованием электронно-лучевой сварки. В настоящее время в РФ для серийного производства заготовок дисков методом гранульной металлургии применяют технологию камерной вакуумно-термической дегазации гранул, заполнения и герметизации капсул.

Согласно разработанному и утвержденному регламенту, в РФ применяется схема, при которой загрузка в капсулу и вакуумно-термическая дегазация гранул производятся в вакуумной камере, в которой размещены вибростол и электронагреватели. Бункер с гранулами пристыковывается сверху к камере. Внутри камеры на пути от бункера к капсуле имеется наклонный нагреваемый лоток, по которому гранульный поток по направляющим совершает зигзагообразный путь с целью нагрева гранул в тонком слое для освобождения от газов и влаги, адсорбированных на поверхности гранул в процессе изготовления и хранения. Загружаемая капсула помещается в камеру между нагревателями. Вакуумирование пустой капсулы в начале процесса обеспечивается через патрубок, затем через воронку засыпаются гранулы. За счет вибрации они уплотняются для получения необходимой плотности утряски, обеспечивающей расчетное формоизменение после горячего изостатического прессования (ГИП). После заполнения капсулы манипулятором в горловину вставляется пробка, которая обваривается электронным лучом.

Данная технология имеет ряд преимуществ перед бескамерной засыпкой и герметизацией капсул:

- обеспечение нагрева и дегазации гранул в потоке;
- простота определения полноты заполнения капсулы в процессе засыпки гранул;
- высокий уровень надежности герметизации капсул после заполнения гранулами.

Однако данная технология имеет недостатки, самым существенным из которых является ограничение по габаритам заполняемых капсул, связанное с необходимостью создания больших и дорогостоящих вакуумных камер [6]. В настоящее время в России имеющийся парк газостатов обеспечивает компактирование капсул с максимальным диаметром 1150–1200 мм.

Капсулы, применяемые для герметизации гранул, как правило, изготавливают методом листовой штамповки, в последнее время широкое применение находит метод ротационной вытяжки. Обычно капсулы имеют форму диска с различными выступами на торцевой части. Согласно действующей в серийном производстве технологии, заполнение капсул типа «диск» осуществляется в вертикальном положении через патрубок, расположенный в верхней части. Это позволяет заполнять капсулы максимальным диаметром до 880–920 мм при массе засыпаемых гранул до 300–400 кг.

Технологические особенности процесса заполнения капсул, такие как плотность утряски, ориентация капсулы, количество патрубков и др., оказывают значительное влияние на формоизменение (усадку) при ГИП. Так, недостаточное количество порошка в капсуле приведет к искажению размеров детали в ходе цикла ГИП или даже ее разрушению (разгерметизации) [7].

Согласно результатам исследований [7–9], фракционный состав является одним из важных параметров [10], влияющих на плотность утряски, наряду с формой частиц и состоянием поверхности [11]. При определенном соотношении размеров гранул плотность упаковки можно существенно повысить [12, 13].

При наличии вибрации (особенно в вакууме) гранульные засыпки обладают способностью растекаться подобно жидкости и заполнять любые свободные полости. Однако как при наличии, так и при отсутствии вибрации они не подчиняются закону сообщающихся сосудов и, например, не поднимаются в трубку, предварительно введенную на любую глубину в емкость, куда засыпаются гранулы [6].

Проектирование капсульной оснастки требует учитывать эти факторы, определяя увеличенные габариты капсул с учетом коэффициентов усадки, полученных на основе данных по формоизменению после компактирования [14]. Как показывает практика, диски и осесимметричные капсулы, заполняемые в вертикальном положении через один патрубок, имеют искажения размеров (эллиптичность) после ГИП [7], что требует увеличения припусков (внешних размеров) на механическую обработку и приводит к увеличению расхода материалов, трудоемкости и в конечном счете сказывается на себестоимости продукции.

У предприятий-заказчиков выявлена потребность в изготовлении изделий большего размера с диаметром капсулы до 1050 мм, в том числе кольцевых заготовок. Технологию горизонтальной засыпки можно реализовать как на используемых в России установках типа УЗГК, так и на вновь создаваемых установках для заполнения и герметизации капсул.

Однако для решения вопроса о применимости этой технологии необходимо предварительно проработать ее на наиболее сложных для заполнения вариантах капсул, провести оценку результатов формоизменения и плотности полученных заготовок после ГИП.

### Материалы и методы

Объектами исследования являются две капсулы, представляющие наибольший интерес для отработки технологии горизонтального заполнения:

– крупногабаритная капсула 1 массой до 350 кг и максимальным наружным диаметром до 1000 мм, массой засыпки гранул до 650 кг и диаметром компактной заготовки после ГИП до 925 мм (рис. 1, а);

– капсула 2 большого наружного диаметра (950 мм) типа «кольцо» с соотношением диаметра и высоты заготовки более 8 (рис. 1, б).

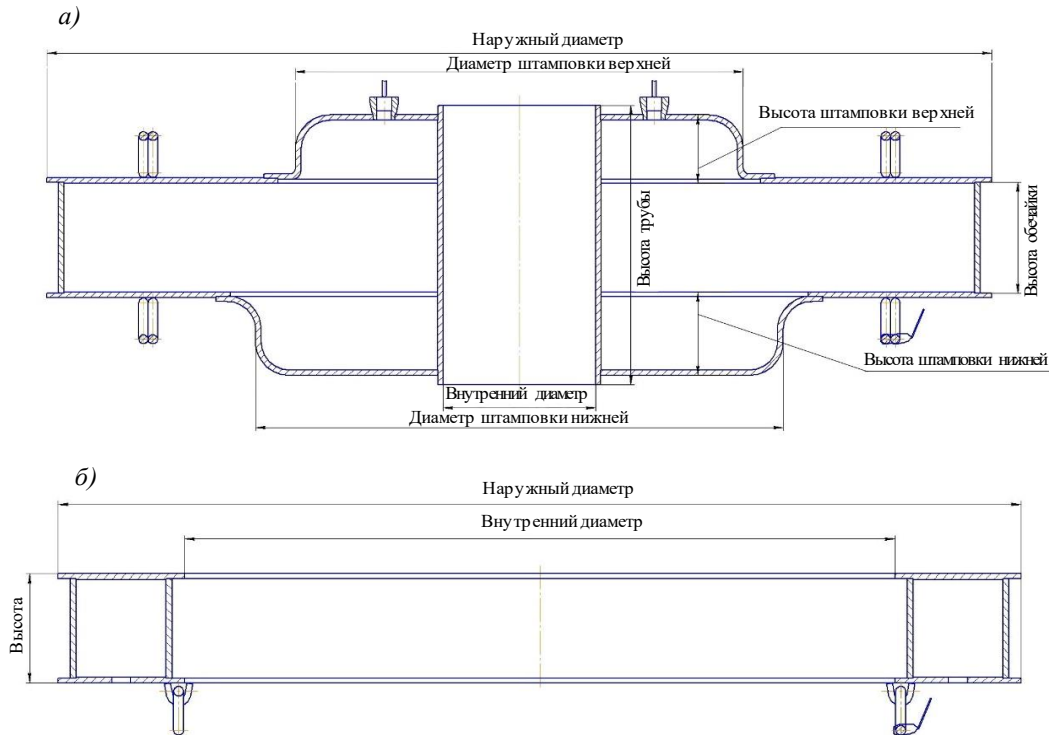


Рис. 1. Схемы конструкции капсул 1 (а) и 2 (без компенсатора) (б)

Отжиг элементов капсул и самих капсул (в сборке) проводили в вакуумных однокамерных электрических печах сопротивления с экранной теплоизоляцией и выдвижным подом по стандартному режиму, принятому в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Для заполнения капсул использованы гранулы сплава ЭП741НП, полученные методом PREP (Plasma Rotate Electrode Process – плазменная плавка и центробежное распыление быстровращающейся заготовки), рассеянные на ситовом полотне с размером ячеек 160×160 мкм. Фракционный состав гранул приведен в табл. 1. Гранулометрический состав определяли методом сухого просеивания по ГОСТ 18318–94 с использованием сит с сеткой 010, 014, 016 и 020 по ГОСТ 6613–86.

Таблица 1

**Фракционный состав гранул сплава ЭП741НП, использованных для заполнения капсул 1 и 2**

Размер частиц фракции, мм	Содержание фракции, %
>200	0
160–200	0,2
140–160	0,5
100–140	49,0
<100	50,3

Капсулы заполняли гранулами в камерной вакуумной установке (рис. 2). Засыпку осуществляли при горизонтальном положении капсулы с одновременным нагревом, дегазацией гранул в летящем потоке, вибрационным уплотнением и последующей герметизацией капсулы электронным лучом. Использован стандартный режим:

- вакуумирование без нагрева;
- нагрев капсулы до температуры процесса, выдержка при температуре процесса;
- подача гранул в капсулу с одновременной дегазацией и уплотнением посредством вибрационного воздействия (при температуре процесса);
- герметизация капсулы и выгрузка после охлаждения с печью.

Фактические объемы капсул определяли по методике, изложенной в работе [15], с помощью гелиевого течеискателя.

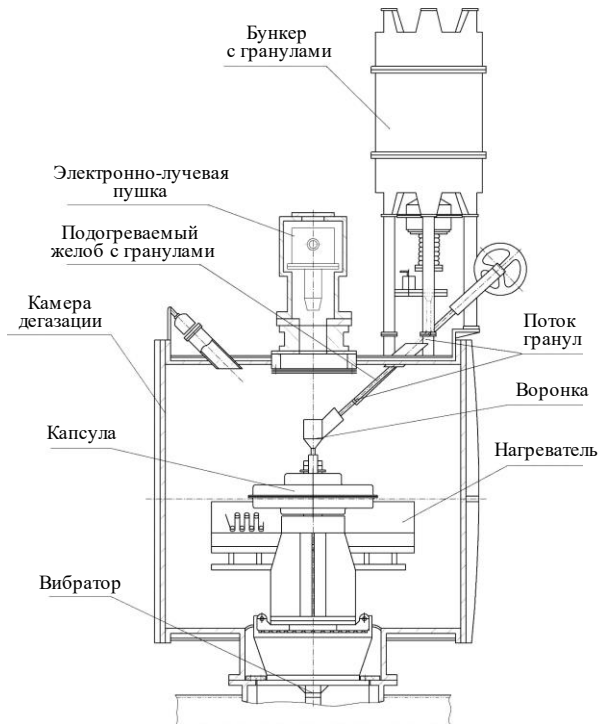


Рис. 2. Схема камерной вакуумной установки засыпки капсул гранулами и герметизации капсулы электронным лучом [7, 16]

Температуры капсулы и нагревателей установки измеряли термоэлектрическими преобразователями. После заполнения и герметизации капсул 1 и 2 проводили ГИП по режиму, принятому для сплава ЭП741НП в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Измерение размеров капсул 1 и 2 и анализ формоизменения компактных заготовок 1 и 2 после ГИП проводили с помощью рулетки по ГОСТ 7502–98 и штангенциркуля по ГОСТ 166–89.

Плотность утряски порошка в объеме капсулы вычисляли по формуле

$$\rho_{\text{утр}} = m/V,$$

где  $m$  – масса порошка в капсуле;  $V$  – объем капсулы.

Относительную плотность рассчитывали по формуле

$$\rho_{\text{отн}} = \rho_{\text{утр}}/\rho_{\text{спл}},$$

где  $\rho_{\text{спл}}$  – плотность сплава (для сплава ЭП741НП  $\rho_{\text{спл}} = 8,39 \text{ г/см}^3$ ).

Коэффициент усадки рассчитывали как соотношение соответствующих габаритных размеров до и после ГИП.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

## Результаты и обсуждение

### Изготовление капсул

Основными особенностями капсулы 1 (рис. 1, а) являются ее габариты и масса. Из-за большого наружного диаметра при изготовлении применена вальцованная труба, что позволило упростить геометрические параметры капсулы и добавить жесткости конструкции, а также снизить затраты на разработку и изготовление новой дорогостоящей штамповой оснастки.

Вальцованная труба изготовлена с помощью развертки из двух частей и последующей их аргоно-дуговой сварки, так как необходимый диаметр трубы больше предусмотренного ГОСТ 8732–78.

Значимыми факторами, влияющими на получение компактных изделий с требуемыми геометрическими параметрами, являются равномерное поступление гранул в капсулу при ее заполнении и высота свободного падения частиц, обеспечивающая частицам определенную кинетическую энергию в зависимости от их массы [16, 17]. Неравномерность заполнения капсул и большая высота свободного падения гранул способны приводить к образованию зон различной крупности – сегрегации, что связано с одной из технологических характеристик сыпучих материалов – углом естественного откоса [18, 19]. Сегрегацию следует считать динамическим фактором, возникающим при свободном падении частиц.

Для уменьшения сегрегации на верхней штамповке для заполнения установлены два стандартных патрубка с межосевым расстоянием 285 мм, которое связано с максимальным углом отклонения электронного луча, обеспечивающего гарантированную качественную заварку патрубков на высоте расположения капсулы относительно электронно-лучевой пушки.

После изготовления капсулу подвергли вакуумному отжигу по серийному режиму. После сварки и отжига определены размеры капсулы (табл. 2).

Таблица 2

Размеры капсулы 1 по чертежу, после сварки и отжига

Параметры	Значения параметров, мм		
	по чертежу	после сварки	после отжига
Наружный диаметр	990,0	988,5	987,0 (988,0)*
Внутренний диаметр	161,0	161,0	160,0 (161,0)*
Диаметр штамповки верхней	472,0	467,5 (469,5)*	471,0 (472,0)*
Диаметр штамповки нижней	557,0	569,0 (572,0)*	576,0 (578,0)*
Высота трубы	318,0	318,0	316,5
Высота обечайки	120,0	119,0	119,0 (123,0)*
Высота штамповки верхней	74,0	75,5 (77,0)*	77,0 (78,0)*
Высота штамповки нижней	90,0	88,0	91,5

\* Минимальное (максимальное) значение параметра.

Анализ данных табл. 2 показывает, что размеры капсулы 1 после сварки близки к размерам по чертежу, значительные отличия выявлены только для диаметра штамповки нижней (больше на 12,0–15,0 мм).

После отжига капсулу проверили на герметичность, определили ее объем (табл. 3). Фактический объем оказался на ~6 % меньше расчетного.

Таблица 3

Объем и масса капсулы 1

Параметры	Значения параметров
Масса капсулы, кг	103,0
Объем капсулы, см <sup>3</sup> :	
расчетный	110474,0
фактический	104027,0
Разница расчетного и фактического объемов капсулы, см <sup>3</sup>	6447,0

Главными особенностями конструкции капсулы 2 (рис. 1, б) являются наличие большого внутреннего отверстия и отсутствие элементов штамповки. Вместо элементов штамповки применены вальцованные трубы с изготовлением развертки из двух частей и последующей их аргоно-дуговой сваркой. Фланцы изготовили из листа толщиной 6 мм.

После сварки определены размеры капсулы 2 (табл. 4). Выявлена небольшая эллипсность как по внешнему, так и по внутреннему диаметру. Средний наружный диаметр незначительно превышает размер по чертежу, а средний внутренний диаметр меньше расчетного. Высота капсулы соответствует чертежу.

Таблица 4

Размеры капсулы 2 по чертежу и после сварки

Параметры	Значения параметров, мм	
	по чертежу	после сварки
Наружный диаметр	949,0	954,0 (959,0)*
Внутренний диаметр	677,0	673,5 (677,0)*
Высота	111,5	111,5

\* Минимальное (максимальное) значение параметра.

Капсула 2 имеет большие диаметр и внутреннее отверстие, поэтому необходимо техническое решение для ее заполнения гранулами и по заварке патрубков. Из-за малого угла отклонения луча электронно-лучевой пушки невозможно заварить патрубки, расположенные по диаметру, равному ~813 мм (табл. 4).

Еще одним фактором, который следует учитывать при разработке технического решения для заполнения капсулы 2, является достижение однородности засыпки по плотности. Обеспечить минимальную сегрегацию при данной конфигурации капсулы с заполнением через одно отверстие не возможно. Неоднородность по плотности и сегрегация по крупности приводят к значимым искажениям размеров изделия после ГИП [16].

Для решения описанных задач разработана и изготовлена специальная система засыпки, которая состоит из компенсатора (емкости, принимающей гранулы) с расходящимися каналами, соединяющими компенсатор и капсулу. Таким образом решается несколько задач:

- уменьшение сегрегации гранул за счет их подачи в капсулу через несколько каналов;
- большее уплотнение за счет давления, создаваемого выше находящимися гранулами в компенсаторе;

– герметизация капсулы через единственный патрубков, расположенный по оси пушки в центральной части компенсатора.

Проведенные после изготовления и отжига капсулы замеры показали, что фактический объем капсулы с компенсатором меньше расчетного на 1,8 % (табл. 5).

Таблица 5

#### Объем и масса капсулы 2

Параметры	Значения параметров
Масса капсулы, кг	72,0
Расчетный объем капсулы, см <sup>3</sup>	23063,1
Объем капсулы с компенсатором, см <sup>3</sup> :	
расчетный	24623,3
фактический	24180,0
Разница расчетного и фактического объемов капсулы с компенсатором, см <sup>3</sup> (%)	443,3 (1,8)

#### Анализ заполнения капсул гранулами

После заполнения и герметизации капсулы 1 и 2 с гранулами взвесили, рассчитали массу гранул в капсулах и плотность утряски (табл. 6).

Таблица 6

#### Масса и плотность утряски гранул в капсулах 1 и 2

Капсула	Масса гранул в капсуле, кг	Объем капсулы, см <sup>3</sup>	Плотность утряски, г/см <sup>3</sup>	Относительная плотность, %
1	604,0	104027,0	5,81	69,20
2	129,5	24180,0	5,36	63,88

Плотность утряски гранул в капсуле 1 составляет 5,81 г/см<sup>3</sup>, что существенно превышает средние значения для вертикального заполнения капсул (5,35–5,40 г/см<sup>3</sup>). Это обеспечит устойчивое формоизменение в процессе ГИП. Данный факт, возможно, связан с массивностью капсулы, простотой конструкции и оптимальным соотношением использованных для заполнения гранул.

Плотность утряски гранул в капсуле 2 (5,36 г/см<sup>3</sup>) находится в пределах средних значений для вертикального заполнения капсул, что также обеспечит устойчивое формоизменение капсулы в процессе ГИП.

Если для капсулы 1 высокую плотность в основном обеспечили ее большой объем и простота формы [20], то для капсулы 2 с узким сечением – наличие компенсатора и заполнение через несколько патрубков.

#### Анализ формоизменения компактных заготовок 1 и 2 после горячего изостатического прессования

Внешний осмотр полученной компактной заготовки 1 не выявил вздутий и аномалий формоизменения и усадки, характерных при разгерметизации капсулы.

После процесса ГИП определены размеры компактной заготовки (табл. 7), проведено сравнение габаритов капсулы 1 и компактной заготовки после ГИП, рассчитаны высотные и диаметральный коэффициенты усадки (табл. 8).

Традиционно в гранульной металлургии для оценки усадки используют основные габаритные размеры, а именно: наружный диаметр, внутренний диаметр и высоту. В данной работе для адекватного сравнения также при расчете усадки будут использованы аналогичные размеры: наружный диаметр, внутренний диаметр и высота (трубы).

Анализ данных табл. 8 показывает, что полученные коэффициенты усадки для компактной заготовки *I* с горизонтальной засыпкой и стандартные коэффициенты усадки для вертикальной засыпки различаются. При использовании горизонтальной засыпки внутренний диаметральный коэффициент увеличился, но высотный и наружный диаметральный коэффициенты уменьшились с 1,17 до 1,13 и с 1,15 до 1,12 соответственно.

Различия могут быть связаны как с ориентацией капсулы при засыпке, так и с большим объемом капсулы *I* и отсутствием сложных каналов и переходов, что обеспечило высокую насыпную плотность, которая напрямую влияет на уменьшение усадки. Кроме того, определенное влияние могли оказать конструктивные особенности капсулы. Сделать однозначный вывод затруднительно, так как отсутствуют статистические данные по засыпке капсулы аналогичного объема в вертикальном положении.

Таблица 7

**Размеры капсулы *I* и компактной заготовки после горячего изостатического прессования (ГИП)**

Параметры	Значения параметров, мм	
	до ГИП	после ГИП
Наружный диаметр	987,0 (988,0)*	878,0
Внутренний диаметр	160,0 (161,0)*	143,2 (143,3)*
Диаметр штамповки верхней	471,0 (472,0)*	416,6 (418,0)*
Диаметр штамповки нижней	576,0 (578,0)*	512,0 (516,3)*
Высота трубы	316,5	280,0
Высота обечайки	119,0 (123,0)*	109,2 (107,7)*
Высота штамповки верхней	77,0 (78,0)*	54,8 (56,4)*
Высота штамповки нижней	91,5	77 (78)*

\* Минимальное (максимальное) значение параметра.

Таблица 8

**Коэффициенты усадки компактной заготовки *I* после горячего изостатического прессования и стандартные (при вертикальной засыпке капсул)**

Параметры	Коэффициенты усадки	
	для капсулы <i>I</i>	стандартные (при вертикальной засыпке капсул)
Наружный диаметр	1,12	1,15
Внутренний диаметр	1,12	1,11
Высота (трубы)	1,13	1,17

Из всех высотных размеров наибольший коэффициент усадки в процессе ГИП (1,39) отмечен для высоты штамповки верхней. Столь значительную усадку можно объяснить тем, что патрубки, через которые заполнялась капсула, находятся на верхней штамповке, в связи с чем слои гранул в верхней штамповке имели меньшую плотность по сравнению со слоями в нижней штамповке, которые дополнительно уплотнились под действием сил тяжести верхних слоев.

Усадка по высотным размерам неоднородна (табл. 7). Наибольшие значения высотных коэффициентов усадки получены для примененных штампованных элементов, наименьший – для обечайки, что можно объяснить разной жесткостью этих элементов.

Интересно отметить, что усадка компактной заготовки *I* произошла равномерно по высоте и диаметру, о чем свидетельствуют близкие значения коэффициентов (1,13 и 1,12 соответственно). Это возможно в условиях всестороннего сжатия (при ГИП), когда жесткость конструкции капсулы во всех направлениях практически одинакова.

Внешний осмотр компактной заготовки 2 также не выявил признаков разгерметизации в процессе ГИП. В табл. 9 представлены размеры капсулы 2 и компактной заготовки после ГИП, в табл. 10 – высотный и диаметральный коэффициенты усадки.

Таблица 9

**Размеры капсулы 2 и компактной заготовки после горячего изостатического прессования (ГИП)**

Параметры	Значения параметров, мм		
	по чертежу	после сварки	после ГИП
Наружный диаметр	949,0	954,0 (959,0)*	856,0 (871,0)*
Внутренний диаметр	677,0	673,5 (677,0)*	571,0 (583,0)*
Высота	111,5	111,5	101,5

\* Минимальное (максимальное) значение параметра.

Таблица 10

**Коэффициенты усадки компактной заготовки 2 после горячего изостатического прессования и стандартные (при вертикальной засыпке капсул)**

Параметры	Коэффициенты усадки	
	для капсулы 2	стандартные (при вертикальной засыпке капсул)
Наружный диаметр	1,108	1,15
Внутренний диаметр	1,170	1,11
Высота	1,100	1,17

На рис. 3 представлено схематическое сравнение изменения объемов и размеров капсулы до и после ГИП.

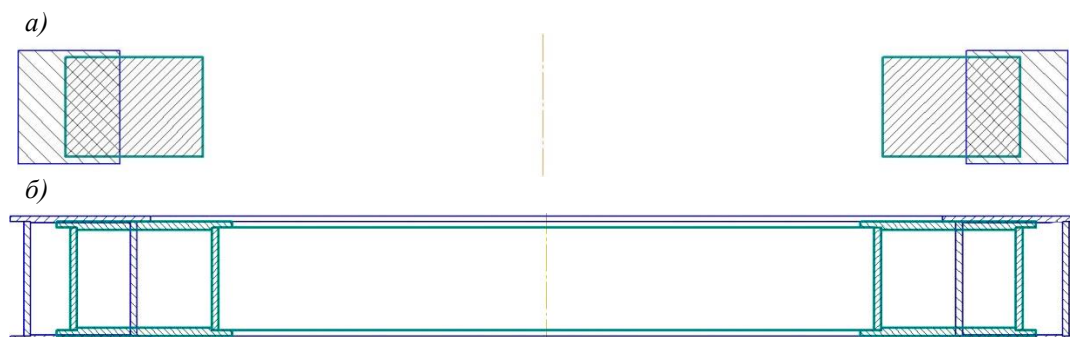


Рис. 3. Схематическое сравнение изменений объемов (а) и размеров (б) капсулы 2 до (—) и после (—) горячего изостатического прессования

При такой конструкции капсулы с вальцованными трубами, фланцами толщиной 6 мм и горизонтальной засыпкой наибольший коэффициент усадки (1,17) получен для внутреннего диаметра, что существенно выше, чем для капсулы 1 и для капсул, заполняемых вертикально. Коэффициенты усадки наружного диаметра и высоты для капсулы 2, наоборот, существенно меньше, чем для капсулы 1 и для капсул, заполняемых вертикально.

Уменьшение высотного коэффициента связано с жесткостью конструкции в высотном направлении, вследствие чего усадка произошла в основном в горизонтальном направлении вдоль центральной оси (рис. 3). О высокой жесткости конструкции в высотном направлении свидетельствуют образовавшиеся мениски (прогибы), показанные

на рис. 4. Вершины мениска – места с повышенной жесткостью (стык), где прошла минимальная усадка, центральная часть (мениск) – место с минимальной жесткостью.

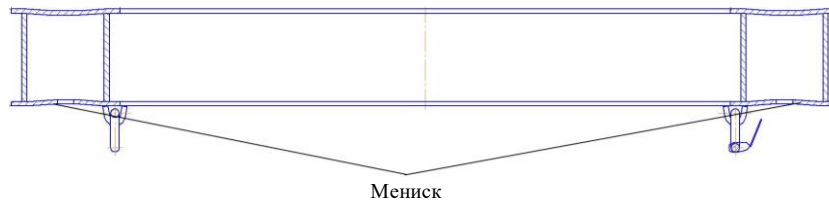


Рис. 4. Мениски, образовавшиеся в процессе горячего изостатического прессования на капсуле 2

### ***Микроструктура компактного материала заготовки 2***

Из компактной заготовки 2 как наиболее сложной для заполнения и проведения ГИП вырезано кольцо и изготовлен шлиф для определения структуры. Установлено, что структура типична для компактного материала из сплава ЭП741НП, остаточной пористости не выявлено (рис. 5). Таким образом, можно констатировать, что компактирование прошло полностью.

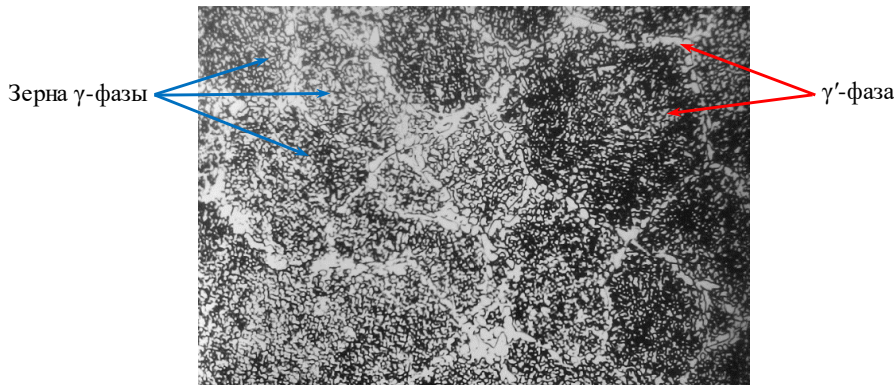


Рис. 5. Микроструктура заготовки 2 после горячего изостатического прессования: двухфазная  $\gamma/\gamma'$ -микроструктура поликристаллического никелевого жаропрочного сплава марки ЭП741НП

### **Заключения**

Изготовлены две крупногабаритные капсулы с применением вальцованных элементов и листового металла. При этом капсула 2 изготовлена без применения штампованных элементов, капсула 1 – с двумя штампованными элементами верхней и нижней части.

Изготовленные капсулы заполнили гранулами сплава марки ЭП741НП в горизонтальном положении. Получены высокие уровни плотности утряски гранул (5,81 и 5,36 г/см<sup>3</sup> для капсул 1 и 2 соответственно), что позволило достичь контролируемого формоизменения и отсутствия дефектов газостатирования. Не выявлено дефектов структуры в образце из материала компактной заготовки 2, что подтверждает правильность выбора материалов капсулы и технических решений по ее заполнению.

Установлено, что значительное влияние на формоизменение компактной заготовки после ГИП оказывают конструкция капсулы и ее элементы. Так, например, для капсулы 1 применение вальцованного обода (наружный диаметр) и фланцев большей толщины привело к большей усадке заготовки по штампованным элементам. Повышенная жесткость конструкции капсулы 2 в высотном направлении привела к образованию менисков и увеличению усадки в диаметральном направлении.

Полученные результаты по формоизменению крупногабаритных и кольцевых заготовок позволяют уточнить коэффициенты усадки, используемые при проектировании капсул с аналогичной конструкцией, в том числе для горизонтальной засыпки, но вместе с тем требуют дальнейшего набора статистики и уточнения.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Востриков А.В., Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Особенности технологии производства деталей авиационных двигателей из гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменной плавки и центробежного распыления литой вращающейся заготовки // *Труды ВИАМ*. 2025. № 10 (152). С. 16–26. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-16-26.
3. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 3–16. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
4. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 30–41. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Получение мелкозернистой структуры отливок из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
6. Самаров В.Н., Непомнящий В.З. Проблемы процессов металлургии гранул // *Технология легких сплавов*. 2008. № 1. С. 9–20.
7. Кошелев В.Я. Исследование процесса, разработка и внедрение промышленной технологии термической дегазации гранул жаропрочных никелевых сплавов типа ЭП741П при производстве заготовок дисков ГТД: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 1985. 36 с.
8. Мусиенко В.Т. Разработка теоретических основ и технологии производства металлических порошков при высоких и сверхвысоких скоростях охлаждения методом центробежного распыления для изготовления деталей газотурбинного двигателя: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М., 1991. 54 с.
9. Ходкин В.И. Исследование процессов и создание технологии импульсно-механической и вакуумно-термической обработки гранул жаропрочных никелевых сплавов при производстве заготовок для двигателестроения: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М.: ВИЛС, 1982. 52 с.
10. Каблов Е.Н. Порошки избавляют от лишнего // *Эксперт*. 2014. № 49 (926). С. 46–51.
11. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // *Труды ВИАМ*. 2017. № 11 (59). С. 46–55. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
12. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 200–214.
13. Князев А.Е., Востриков А.В. Рассев порошков в аддитивном и гранульном производствах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 11 (93). С. 11–20. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
14. Самаров В.Н. ГИП деталей сложной формы. Итоги и проблемы // *Технология легких сплавов*. 2000. № 6. С. 69–72.

15. Шорошев Ю.Г., Рехвиашвили Э.Э., Фаткуллин О.Х. Разработка методики и установки для определения объема капсул перед горячим изостатическим прессованием гранул // *Металлургия гранул*. 1986. Вып. 3. С. 83–86.
16. Кошелев В.Я., Бувин Е.П., Кононов И.А. и др. Некоторые особенности технологии группового заполнения гранулами крупногабаритных капсул в установках типа УЗГК // *Металлургия гранул*. 1989. Вып. 5. С. 193–197.
17. Ходкин В.И., Тарарышкина Т.Л. Влияние режимов заполнения капсул гранулами на сегрегацию их по крупности // *Металлургия гранул*. 1983. Вып. 1. С. 110–114.
18. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. М.: Химия, 1982. 255 с.
19. Кошелев В.Я., Гарибов Г.С. Влияние плотности засыпки гранул жаропрочных никелевых сплавов на формоизменение капсул при горячем изостатическом прессовании // *Технология легких сплавов*. 2013. № 1. С. 27–33.
20. Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов / пер. с англ. Г.И. Арбачаковой под ред. М.И. Агошкова. М.: Мир, 1968. 164 с.

### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Vostrikov A.V., Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Peculiarities of the technology of production of aircraft engine parts from granules of heat-resistant nickel alloys by the method of plasma melting and centrifugal spraying of a cast rotating blank. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 16–26. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-16-26.
3. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 3–16. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
4. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 30–41. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. Narsky A.R., Deynega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
6. Samarov V.N., Nepomnyashchy V.Z. Problems of Granule Metallurgy Processes. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2008, no. 1, pp. 9–20.
7. Koshelev V.Ya. *Study of the Process, Development, and Implementation of Industrial Technology for Thermal Degassing of Granules of Heat-Resistant Nickel Alloys of the EP741P Type in the Production of GTE Disk Blanks*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 1985, 36 p.
8. Musienko V.T. *Development of Theoretical Foundations and Technology for the Production of Metal Powders at High and Ultra-High Cooling Rates by Centrifugal Atomization for the Manufacture of Gas Turbine Engine Components*: thesis abstract, Dr Sc. (Tech.). Moscow, 1991, 54 p.
9. Khodkin V.I. *Research of processes and creation of technology for pulse-mechanical and vacuum-thermal treatment of granules of heat-resistant nickel alloys in the production of blanks for engine building*: thesis abstract, Dr Sc. (Tech.). Moscow: VILS, 1982, 52 p.
10. Kablov E.N. Powders eliminate excess. *Ekspert*, 2014, no. 49 (926), pp. 46–51.
11. Knyazev A.E., Nerush S.V., Alishin M.I., Kuko I.S. Researches of the technological properties of metal-powder compositions of Ti-4-6 and VT20 titanium alloys obtained by induction melting and gas atomization. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), pp. 46–55. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: January 09, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.

12. Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. *Modern technologies in powder metallurgy*: textbook. St. Petersburg: Publ. house of the Polytech. Univ., 2010, pp. 200–214.
13. Knyazev A.E., Vostrikov A.V. Sieving of powders additive and powder manufacturings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), pp. 11–20. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
14. Samarov V.N. Hot isostatic pressing of complex-shaped parts. Results and problems. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2000, no. 6, pp. 69–72.
15. Shoroshev Yu.G., Rekhviashvili E.E., Fatkullin O.Kh. Development of a method and installation for determining the volume of capsules before hot isostatic pressing of granules. *Metallurgiya granul*, 1986, is. 3, pp. 83–86.
16. Koshelev V.Ya., Buvin E.P., Kononov I.A. et al. Some features of the technology of group filling of large-sized capsules with granules in UZGK-type installations. *Metallurgiya granul*, 1989, is. 5, pp. 193–197.
17. Khodkin V.I., Tararyshkina T.L. Effect of Granule Filling Modes in Capsules on Granule Segregation by Size. *Metallurgiya granul*, 1983, is. 1, pp. 110–114.
18. Andrianov E.I. *Methods for Determining Structural and Mechanical Characteristics of Powdered Materials*. Moscow: Khimmiya, 1982, 255 p.
19. Koshelev V.Ya., Garibov G.S. Effect of Heat-Resistant Nickel Alloy Granule Filling Density on Capsule Forming during Hot Isostatic Pressing. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, is. 1, pp. 27–33.
20. Dzhenike E.V. *Storage and Release of Bulk Materials*. Trans. from Engl. by G.I. Arbachakova, ed. M.I. Agoshkova. Moscow: Mir, 1968, 164 p.

#### *Информация об авторах*

**Князев Андрей Евгеньевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Мин Павел Георгиевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Логунов Александр Вячеславович**, ведущий инженер, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### *Information about the authors*

**Andrey E. Knyazev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel G. Min**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksandr V. Logunov**, Leading Engineer, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 09.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.04.2026.  
The article was submitted 09.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 20.04.2026.