

УДК 669.295:621.762

Павленко Д. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ПРЕССОВОК

Цель работы. Установить основные закономерности уплотнения порошков титана марки ПТ5 на этапах прессования и спекания, а также закономерности распределения пористости в спеченных заготовках.

Методы исследования. Титановые прессовки получали путем холодного одностороннего прессования порошков при различных давлениях и последующего вакуумного спекания. Для исследования пористости прессовок на основе порошка титана марки ПТ5 использовали метод гидростатического взвешивания и анализа микрофотографий шлифов. Для обработки экспериментальных данных использовали методы математической статистики. Объектом исследования являлся процесс уплотнения титановых прессовок. Предметом исследования являлись закономерности изменения плотности и пористости прессовок, а также их геометрических размеров в зависимости от давления прессования.

Полученные результаты. Приведены результаты исследования распределения пористости в цилиндрических прессовках из порошка титана ПТ5 при одностороннем холодном прессовании и последующем вакуумном спекании. Установлены основные закономерности распределения пористости в спеченных прессовках и их локальных частях. Показано, что для прессовок диаметром 40 мм и высотой 70 мм минимальное значение пористости, после одностороннего прессования при давлении 700 МПа и спекания при температуре 1250 °С в течение 2,5 ч, наблюдается в центральной верхней части и составляет 4,5%. Максимальная пористость наблюдается в нижней части, в периферийной зоне. Среднее значение пористости составляет 8,8%, что свидетельствует о наличии преимущественно закрытых пор. Показано, что распределение пор в средней части прессовок подчиняется закону нормального распределения. На основании исследования плотности и геометрии прессовок после прессования с различными режимами и последующего вакуумного спекания установлены закономерности изменения пористости и размеров. Показано, что при давлении прессования больше 620...640 МПа последующее вакуумное спекание приводит к увеличению линейных размеров прессовок. Прессование при более низком давлении способствует формированию открытой пористости, что обеспечивает повышение плотности при спекании и усадке. На основании установленных закономерностей обоснован рациональный диапазон давления прессования. Определен параметр прессуемости исследованных порошков и установлено давление прессования, при котором обеспечивается получение беспористой (компактной) прессовки. Показано, что, учитывая эффект появления вторичной пористости в процессе спекания, для получения компактных спеченных заготовок, имеющих 100% плотность, технологический процесс должен включать операции деформационной обработки прессовок после спекания.

Научная новизна. Установлены закономерности изменения плотности, пористости и линейных размеров титановых прессовок в зависимости от давления прессования с учетом консолидации вакуумным спеканием.

Практическая ценность. На основании установленного распределения пористости в цилиндрических прессовках выполнен анализ пористости заготовок для выбора режимов интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии. Установлена рациональная величина давления прессования, при которой обеспечивается минимальное изменение линейных размеров прессовок в процессе спекания.

Ключевые слова: порошковая металлургия; титан; прессовка; прессование; спекание; давление; уплотнение; пористость; размер.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение цен на энергетические ресурсы и необходимость сокращения вредных выбросов в окружающую среду способствуют поиску новых и развитию существующих энергосберегающих технологий во всех отраслях промышленности. Одной из актуальных задач, связанных со снижением стоимости производства газотурбинных двигателей (ГТД), является разработка ресурсо-

сберегающих технологий получения полуфабрикатов титановых сплавов различных марок и деталей из них. Это связано с широким применением в конструкции современных ГТД титановых сплавов, высокой стоимостью и значительными затратами энергетических ресурсов при их производстве и обработке, оказывающими негативное влияние на окружающую среду и, соответственно, себестоимости изделий.

© Павленко Д. В., 2018

DOI 10.15588/1727-0219-2018-1-X

ISSN 1727-0219 Вестник двигателестроения № 1/2018

Так, например, для получения деформированного полуфабриката сложнелегированных титановых сплавов при применении традиционной технологии трехкратного переплава расходоуемого электрода в вакуумной гарнисажной печи на выплавку 1 тонны титана используется около 80 МВт электрической энергии, а также порядка 270 кубических метров природного газа расходуется на подогрев сляба при дальнейшей деформационной обработке.

В связи с этим, в настоящее время являются актуальными задачи, связанные с развитием ресурсосберегающих технологий получения заготовок из титановых сплавов. Одна из таких технологий основана на методах порошковой металлургии. Спекание частиц порошков в твердой фазе и получение заготовок деталей машин, требующих минимальный объем механической обработки, делает технологию получения заготовок на основе методов порошковой металлургии не только конкурентоспособной в сравнении с технологией получения заготовок литьем, но и экономически обоснованной [1, 2, 3]. Интеграция современных технологий порошковой металлургии, интенсивной пластической деформации, высокоскоростного резания позволит значительно сократить затраты энергетических ресурсов на изготовление изделий из титановых сплавов, повысит их конкурентоспособность на мировом рынке высокотехнологичной продукции.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Технологии порошковой металлургии и обработки порошковых заготовок высоким давлением исследуются и успешно применяются в различных отраслях промышленности уже достаточно давно [4, 5]. С использованием методов порошковой металлургии получают высокоточные заготовки из цветных и черных металлов для автомобильной, электротехнической и ряда других отраслей промышленности (рис. 1а). Однако, доля деталей, полученных из порошков, в авиационном двигателестроении незначительна, что является следствием ряда недостатков, свойственным спеченным материалам.

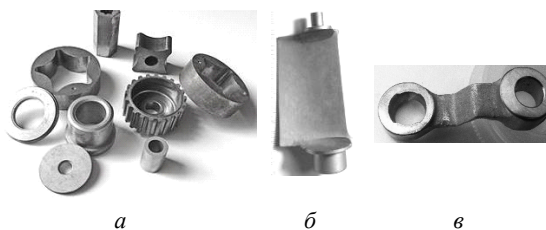


Рисунок 1. Заготовки, полученные методами порошковой металлургии для различных отраслей промышленности: а – детали машин, б – лопатка направляющего аппарата ГТД; в – рычаг управления положением лопаток направляющего аппарата двигателя ТВ3-117

Применительно к сложнелегированным титановым сплавам, в первую очередь, к ним следует отнести остаточную пористость, а также неомогенность структурного и фазового состава. Оба эти фактора значительно снижают уровень прочности изготавливаемых из них деталей и увеличивают рассеяние прочностных характеристик. Особенно данное условие проявляется при работе в условиях переменных нагрузок, свойственным авиационной технике [7]. По этой причине в настоящее время разрабатываются технологии получения из порошков лопаток статора компрессора ГТД (рис. 1б), рычагов управления положением лопаток направляющего аппарата (рис. 1в) и ряда других, работающих при незначительных статических нагрузках деталей.

Несмотря на это, применение технологий порошковой металлургии в авиадвигателестроении является весьма перспективным [8]. Залогом успешного развития являются развитие методов устранения пористости как в объеме, так и в поверхностном слое деталей, а также технологий оценки прочностной надежности порошковых заготовок с учетом особенностей морфологии порового пространства.

Установление и изучение закономерностей уплотнения спеченных титановых заготовок является актуальной задачей в связи с разработкой технологий их дальнейшего упрочнения путем обработки давлением [9, 10]. При этом могут применяться как традиционные методы обработки давлением, методы интенсивного пластического деформирования (ИПД), так и методы упрочнения поверхностных слоев деталей. Основным эффектом упрочнения при этом достигается в основном за счет устранения пористости, а также при применении методов интенсивной пластической деформации.

Режим обработки спеченных заготовок должен определяться исходя из механических характеристик обрабатываемого материала и величины исходной пористости. Исследования, приведенные в работе [11] показывают, что исходная пористость заготовок является ключевым параметром в выборе величины противодавления при винтовой экструзии спеченных заготовок. Практический опыт винтовой экструзии также показал, что при нерациональных режимных параметрах процесса возможно как разрушение заготовок (рис. 2а), так и их успешная деформация (рис. 2б).

Принимая во внимание тот факт, что исходные заготовки для ИПД методом винтовой экструзии изготавливаются из цилиндрических формовок электроэрозионным методом (рис. 3), необходимо оценить равномерность распределения пористости в их объеме.



а



б

Рисунок 2. Общий вид титановых образцов в исходном состоянии; разрушившихся в процессе деформации (а) и после 5-ти циклов деформации винтовой экструзией (б)



а



б



в

Рисунок 3. Общий вид прессовок после спекания (а), вырезка заготовок из прессовок для ИПД (б) и цилиндрические образцы для исследования распределения пористости (в)

Особенности плотности формовок при различных условиях прессования изучались как отечественными, так и зарубежными исследователями. Известно [12], что при формовании порошков и порошковых смесей в одностороннем прессовании в жестких пресс-формах наблюдается линейный закон изменения пористости от верхнего торца прессовки, взаимодействующего с пуансоном, к нижнему. Наличие трения частиц порошка о стенки прессовки и различие в условиях деформации частиц также приводят к неравномерности пористости в радиальном направлении.

На изменение плотности и пористости прессовок в зависимости от давления прессования, а также на их изменение при спекании указывают авторы работы [13]. В этой и ряде других работ показано, что изучение закономерностей уплотнения является важным аспектом для обеспечения точности изготавливаемых методом порошковой металлургии деталей. Изменение линейных размеров спекаемых заготовок может оказывать значительное влияние на их точность. Необходимо отметить, что в зависимости от параметров применяемых порошков, режимов прессования и спекания возможно как уменьшение, так и увеличение размеров заготовок. При этом, несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных моделированию процесса компактирования порошков, например [14, 15 и др.], исследования порошков титана, полученным методом механического размола титановой губки, применяемые для получения спеченных заготовок в авиадвигателестроении [16] весьма ограничены.

2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – установление основных закономерностей уплотнения порошков титана марки ПТ5 на этапах прессования и спекания, а также закономерностей распределения пористости в спеченных заготовках. Для ее достижения были решены задачи, связанные с исследованием распределения пористости в объеме заготовки после прессования на различных масштабных уровнях, а также их эволюции в зависимости от режима прессования и спекания.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполняли для порошков титана марки ПТ5, полученного из отсева нефракционных частиц в процессе разделки блока титана губчатого производства Запорожского титаномагниевого комбината [16]. Порошки соответствовали ТУ У14-10-026-98 и до использования хранились в закрытой таре. Для получения сплава ВТ8 использовали порошковую смесь, полученную путем смешивания порошка основы с порошками легирующих элементов в барабане-смесителе. Компактирование выполняли односторонним прессованием в жестких пресс-формах при комнатной температуре. Давление прессования цилиндрических заготовок, используемых для изготовления заготовок для ИПД винтовой экструзией, составляло 700 МПа. Спекание выполняли в вакууме при температуре 1250 °С. Продолжительность изотермической выдержки в вакуумной печи составляла 2,5 часа. Охлаждение заготовок выполняли совместно с печью. Для обеспечения требуемого химического состава пресс-

совок вводили легирующие элементы в виде порошков чистых металлов.

Исследование пористости выполняли методом гидростатического взвешивания. Использовали весы с погрешностью 0,01 г. Поверхность образцов при погружении в дистиллированную воду защищали слоем парафина. При расчете пористости плотность компактного тела принимали равной плотности сплава ВТ1-0, составляющей 4510 кг/м³. Оценку пористости по микрофотографиям выполняли при помощи программы Image-Pro Plus.

Для оценки уплотняемости порошков в соответствии с рекомендациями [17] выполняли одностороннее прессование в жесткой пресс-форме диаметром 20 мм. Навеску порошков выбирали таким образом, чтобы высота формовок была соизмерима с диаметром. Прессование выполняли при трех различных усилиях, соответствующих давлению прессования 300, 500 и 700 МПа. Измерение диаметра формовок до и после спекания выполняли микрометром с точностью 1 мкм. Диаметр прессовки контролировали в трех различных сечениях. По результатам измерений рассчитывали среднее значение размера и стандартное отклонение с учетом объема выборки измерений для уровня доверительной вероятности 95%. Выполняли не менее трех прессовок при каждом из исследованных усилий прессования. Результаты измерений усредняли. Для прессовок контролировали массу, геометрические размеры, плотность и пористость до и после спекания.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Для оценки распределения пористости в пределах спеченной прессовки высотой 70 мм и диаметром 40 мм (рис. 4а), используемой для последующего изготовления заготовок для ИПД методом винтовой экструзии, после вакуумного спекания, электроэрозионным методом вырезали 20 цилиндрических образцов диаметром 12 мм и высотой 30 мм (рис. 3в). Для каждого образца определяли значение общей пористости по результатам трех измерений методом гидростатического взвешивания. Значение пористости для различных зон прессовки после спекания и изолинии распределения показаны на рис. 4.

Гистограмма распределения пористости в объеме прессовки (рис. 5) указывает на хорошее соответствие закона распределения функции Gumbel, плотность распределения для которой определяется выражением:

$$f(x) = \frac{1}{b} \cdot e^{-\frac{x-a}{b}} \cdot e^{e^{-\frac{x-a}{b}}} \quad (1)$$

Несоответствие установленного закона распределения пористости в объеме спеченной прессовки нормальному распределению объясняется наличием закономерностей формирования порового пространства в ее различных частях.

Так, минимальное значение пористости характерно для верхней части спеченного полуфабриката, контактирующего с пуансоном и составляет 4,5%, при этом, как и свойственно одностороннему прессованию, величина пористости увеличивается по мере приближения к основанию прессовки (рис. 4б), где составляет 20,2%.

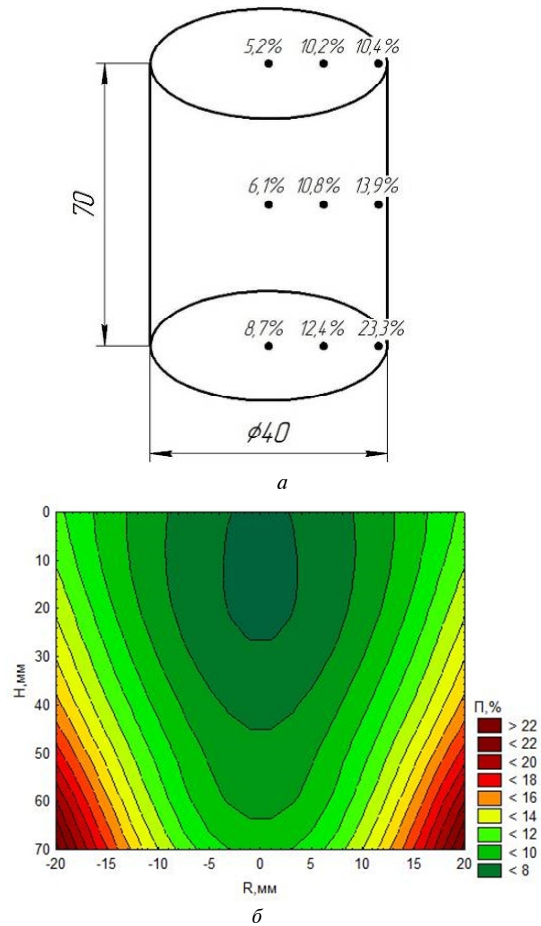


Рисунок 4. Распределение пористости в объеме спеченной прессовки (давление прессования 700 МПа (а) и изолинии распределения пористости (сплайновая интерполяция) (б))

С учетом установленного закона распределения среднее значение пористости в спеченной прессовке составляет 8,8%, что свидетельствует о наличии преимущественно закрытых пор. Распределение пористости в радиальном направлении прессовки также неравномерно. Минимальное значение характерно для центральной зоны, максимальное — для периферийной. Таким образом, максимальная пористость соответствует периферийным зонам прессовки в нижнем сечении, контактирующем при прессовании с неподвижным

пуансоном. Наблюдаемые закономерности обусловлены действием сил трения между пуансонами и стенками пресс-формы.

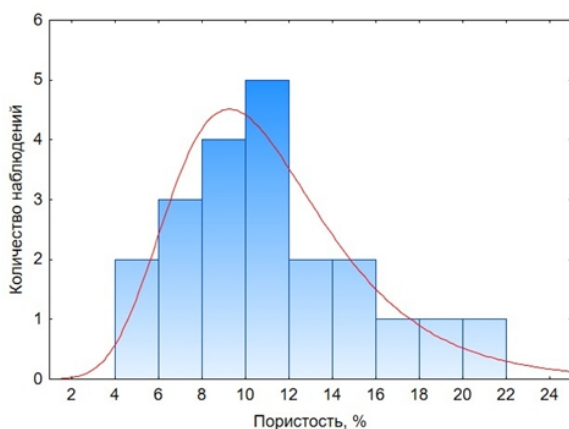


Рисунок 5. Эмпирическое и теоретическое распределение пористости в прессовке после спекания (распределена Gumbel $a = 8,9335$; $b = 3,1459$)

Пористость определяли для 20-ти отдельных зон по макрофотографиям поперечного сечения рабочей зоны образца (рис. 6б).

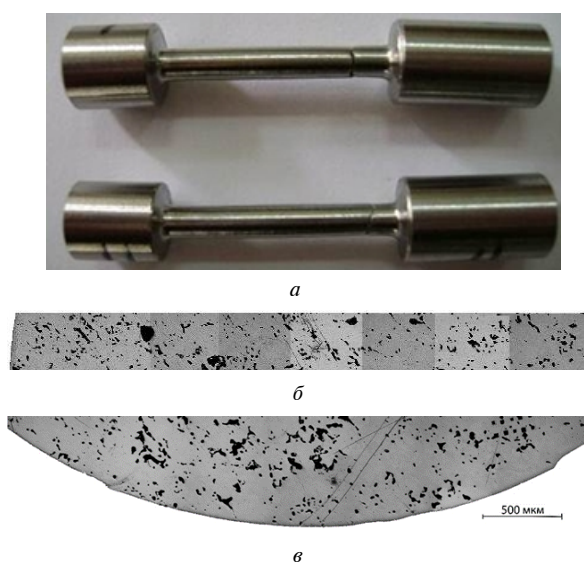


Рисунок 6. Общий вид образца, вырезанного из центральной части спекленной прессовки (а) и макрофотография поперечного сечения в рабочей зоне в центральной (б) и периферийной (в) частях

Анализ статистических данных распределения пористости показал, что плотность вероятности ее распределения подчиняется нормальному закону (рис. 7), что свидетельствует о их случайном характере. Средняя пористость составляет 8...9%, в то время как в образце присутствуют локальные участки с пористостью 4...5% и 13...14%. При этом минимальная пористость наблюдается для периферийной части образца (рис. 6в), что, вероятно, является следствием уплотнения повер-

хностного слоя под действием силы резания в процессе механической обработки.

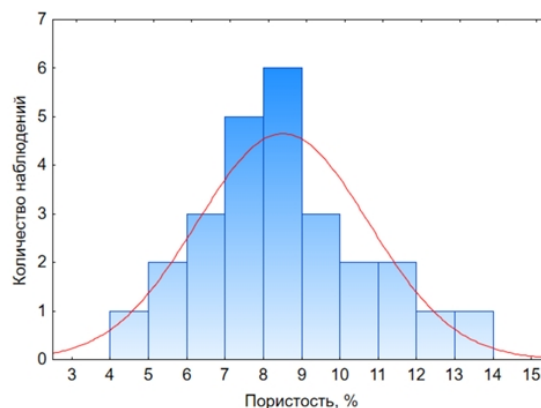


Рисунок 7. Гистограмма распределения пористости в поперечном сечении цилиндрического образца из средней части спекленной прессовки

Таким образом, установленные закономерности распределения пористости в объеме цилиндрической прессовки и на макроуровне показывают, что вырезка заготовки для ИПД методом винтовой экструзии из центральной части спекленной прессовки обеспечивает разность величины пористости между ее верхней и нижней частью не более 3,5%, а средняя пористость заготовки находится в диапазоне 8...9%. Это позволяет, исходя из рекомендаций работы [11], оценить режимные параметры винтовой экструзии, основными из которых являются давление и противодавление прессования.

Очевидно, что в случае серийного или массового производства деформированных титановых полуфабрикатов по технологии ИПД спекленных заготовок методом винтовой экструзии [18], вырезка заготовок из цилиндрических прессовок является нерациональной с точки зрения коэффициента использования материала и трудоёмкости. Перспективным является использовать основное преимущество технологии порошковой металлургии и выполнять прессование заготовок, форма и размеры которых соответствуют заготовкам для винтовой экструзии. Изменение размеров и пористости прессовок в процессе прессования и спекания затрудняет выбор режимов компактирования для получения точных заготовок.

Для изучения особенностей изменения пористости и геометрии прессовок после прессования с различным давлением и спеканием, выполняли прессование образцов диаметром 20 мм при различном давлении (рис. 8). После прессования все образцы спекали в вакуумной печи одновременно.

Результаты исследования пористости прессовок, прессование которых выполняли с различным давлением до и после спекания, а также их геометрических размеров, позволили оценить уп-

рочняемость порошка и установить основные закономерности изменения пористости в процессе компактирования и консолидации вакуумным спеканием (рис. 9, 10).

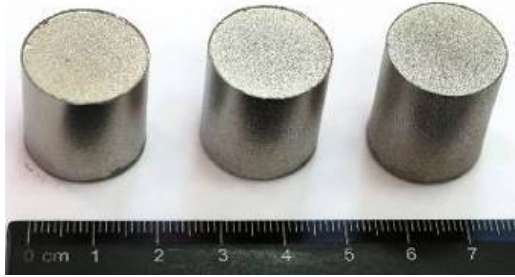


Рисунок 8. Общий вид образцов спрессованных при различном давлении

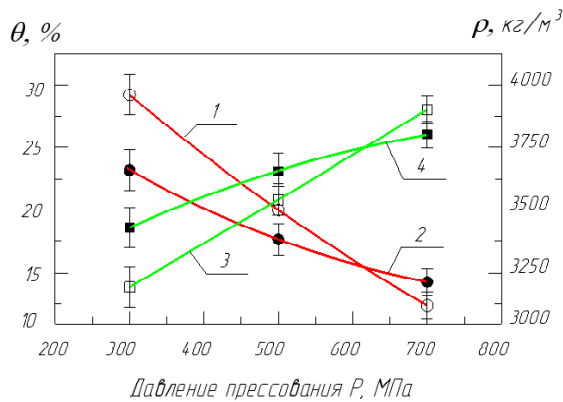


Рисунок 9. Зависимость пористости (θ) и кажущейся плотности (ρ) прессовок от давления прессования: 1 – пористость до спекания; 2 – пористость после спекания; 3 – кажущаяся плотность до спекания; 4 – кажущаяся плотность после спекания

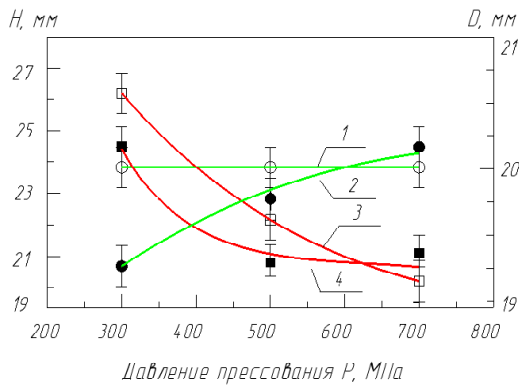


Рисунок 10. Зависимость высоты (H) и диаметра (D) прессовок от давления прессования: 1 – диаметр до спекания; 2 – диаметр после спекания; 3 – высота до спекания; 4 – высота после спекания

Анализ зависимости пористости от давления прессования показывает (рис. 9), что с увеличением давления пористость прессовок уменьшается. Последующее вакуумное спекание приводит к изменению пористости, однако его влияние неоднозначно и определяется величиной

давления, при котором получена прессовка. Так, для прессовок, компактирование которых выполняли при давлении не более 620...640 МПа, спекание приводило к уменьшению пористости и, соответственно, увеличению кажущейся плотности. Для прессовок, полученных прессованием при более высоком давлении, пористость при спекании увеличивалась, наблюдалось их разуплотнение (рис. 9).

Исследование геометрии прессовок также позволило установить неоднозначное влияние давления предварительного прессования. Для прессовок, полученных при давлении прессования не превышающем 620...640 МПа, при спекании наблюдается уменьшение диаметра и высоты. При более высоких давлениях прессования диаметр и высота прессовок увеличивались (рис. 10).

Установленные закономерности могут быть объяснены наличием в порах газа, а также газо-выделением с их поверхности в процессе спекания. При этом давление прессования оказывает влияние на характер порового пространства прессовок. При давлении ниже 620...640 МПа в прессовке формируется преимущественно открытые, взаимно сообщающиеся поры. Увеличение давления прессования приводит к их захлопыванию. Таким образом, при спекании открытые поры захлопываются, так как имеют возможность для выхода газов. Наблюдается усадка заготовок. Из закрытых пор газы не имеют возможность свободно выйти и, таким образом, в результате их расширения кажущаяся плотность заготовки уменьшается, а пористость незначительно увеличивается. Наблюдается увеличение линейных размеров прессовок. Эффект появления газовой пористости особенно проявляется при использовании в составе шихты гидрированного титана [19].

Причиной увеличения размеров может являться также появление, свойственной для сложноголегированных сплавов, диффузионной пористости, вызванной различной скоростью диффузии порошков легирующих элементов при твердофазном спекании.

Для описания зависимости, связывающей плотность прессовок и давление прессования, использовали известное уравнение М.Ю. Бальшина, которое описывает процесс уплотнения порошковых материалов в широком диапазоне изменения указанных характеристик [20]. В логарифмической форме оно может быть записано в виде:

$$\lg(P) = m \cdot \lg(\bar{\rho}) + \lg(P_{\max}), \quad (2)$$

где P – давление прессования; МПа; P_{\max} – давление прессования, обеспечивающее получение беспористой (компактной) прессовки, МПа; $\bar{\rho}$ – относительная плотность прессовки; %; m – показатель прессуемости, зависящий от свойств порошка.

Зависимость (2) для исследованных прессовок имеет вид:

$$\lg(P) = \lg(\bar{\rho}) + 3,82 . \quad (3)$$

Значение показателя прессуемости для исследованных порошков близко к единице, а расчетное давление, необходимое для получения беспористой заготовки, составляет $6,6 \cdot 10^3$ МПа. Полученная расчетная величина давления указывает на то, что ее достижение для прессования полуфабрикатов, размер которых достаточен для изготовления деталей ГТД, возможно при использовании прессового оборудования большой мощности. Так, например, для рассмотренных заготовок диаметром 20 мм расчет по формуле (3) показывает, что для получения компактной заготовки, плотность которой соответствует плотности литого титана, прессование должно выполняться при усилии не менее $2,07 \cdot 10^3$ кН. Однако, с учетом установленных закономерностей уменьшения плотности для прессовок, полученных при высоком давлении за счет появления вторичной пористости (газовой и диффузионной), получение абсолютно компактных заготовок после спекания в твердой фазе является труднодостижимой задачей.

5 ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования плотности и геометрии спеченных титановых прессовок на различных масштабных уровнях, а также в зависимости от усилия прессования, позволили установить основные закономерности уплотнения на этапах компактирования и консолидации.

Установлено, что минимальное значение пористости прессовки диаметром 40 мм и высотой 70 мм после одностороннего прессования при давлении 700 МПа и спекания при температуре 1250°C в течение 2,5 ч. наблюдается в центральной верхней части и составляет 4,5%. Максимальная пористость наблюдается в нижней части в периферийной зоне и составляет 20,2%. Среднее значение пористости составляет 8,8%, что свидетельствует о наличии преимущественно закрытых пор.

Установлено, что пористость в центральной части прессовок после спекания подчиняется закону нормального распределения, что свидетельствует об их случайном характере. Средняя величина пористости составляет 8...9%, в то время как в образце присутствуют локальные участки с пористостью 4...5% и 13...14%. Установлено наличие поверхностного уплотненного слоя в результате воздействия на него силы резания при механической лезвийной обработке.

Установлены зависимости, связывающие величину кажущейся плотности и пористости, а также геометрических размеров прессовок в различном состоянии с давлением прессования. Показано, что при давлении прессования более

620...640 МПа последующее вакуумное спекание приводит к формированию закрытых пор и увеличению геометрических размеров прессовок за счет появления вторичной пористости. Прессование при более низких давлениях способствует формированию открытой пористости, что обеспечивает повышение плотности при спекании и усадки прессовок.

На основании установленных закономерностей уплотняемости, связывающей плотность прессовок и давление прессования установлено, что величина давления, необходимого для получения компактных прессовок из исследованного порошка составляет не менее $6,6 \cdot 10^5$ МПа. Установленное значение давления прессования для заготовок средних размеров делает процесс получения компактных заготовок в условиях серийного производства нерациональным, так как для его обеспечения требуется прессовое оборудование большой мощности. Явления, протекающие в прессовках, полученных при большом давлении в процессе твердофазного спекания, не позволяют получать заготовки со 100% плотностью.

Таким образом, для эффективного уплотнения прессовок из порошков на основе титана и получения компактных заготовок деталей авиационных двигателей в условиях серийного производства, рациональным является дополнительное применение методов обработки давлением спеченных прессовок, наиболее эффективно устранение остаточной пористости могут обеспечивать методы, реализующие интенсификацию сдвиговых деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения /О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева, и др. // Наука та інновації. – 2005. – Т 1. – №2. – С. 44–57.
- [2]. Martin Jackson Titanium – 21st century // Materials world. – № 3. – 2007. – P. 32–34.
- [3]. George Zheng CHEN The FFC cambridge process for metal production: principle, practice and prospect: 3rd International Slag Valorisation Symposium transition to sustainable materials management 19–20 March 2013 Leuven, Belgium. – P. 217–233.
- [4]. Green strength of powder compacts provided for production of highly porous titanium parts / Laptev A., O. Vyal, M. Bram, H. P. Buchkremer, D. Stover // Powder Metallurgy. – 2005. – Vol. 48. – № 4. – P. 358–364.
- [5]. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – 444 с.
- [6]. Инновационные технологические решения [Электронный ресурс] Режим доступа на 09.05.2018 <http://www.kodamet.com>.

- [7]. Сопротивление усталости сплава Ti-6Al-4V, полученного методом порошковой металлургии / О.М. Ивасишин, К.А. Бондарева, В.И. Бондарчук, и др. // Проблемы прочности. – 2004. – № 3. – С. 5–13.
- [8]. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б.Е. Карасева. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
- [9]. Matthieu Bardet. Processing of titanium-based composite materials with nanosized TiC and TiB reinforcements using different powder metallurgy processes: hydrogenation/dehydrogenation sintering, and severe plastic deformation (Equal Channel Angular Pressing: ECAP). Material chemistry. University de Bordeaux, 2014. English.
- [10]. Павленко Д. В. Методологія обробки титанових сплавів при виготовленні деталей газотурбінних двигателів / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения. – 2017. – №1. – С. 83–92.
- [11]. Kuz'mov A. V. Analysing the twist extrusion of porous blanks using modified theories of plasticity for porous bodies / A. V. Kuz'mov, M. B. Shtern, E. G. Kirkova, Ya. E. Beygel'zimer, D. V. Pavlenko // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – Vol. 54, № 11–12. – P. 631–640.
- [12]. Vamsi Krishna B. Inferences on plastic properties and coefficient of friction during simultaneous compression deformation of dissimilar sintered powder metallurgical preforms / B. Vamsi Krishna, P. Venugopal, K. Prasad Rao // Materials Science and Technology. – 2004. – Vol. 20, Issue 3. – P. 322–334.
- [13]. Compacting of metal powders [Электронный ресурс] Режим доступа на 18.05.2018 <https://mail.pk.edu.pl/~mnykiel/iim/KTM/MP/DOWNLOAD/pdf/CHAPT04.PDF>.
- [14]. Sinka I.C. Modelling Powder Compaction / I. C. Sinka // KONA. – 2007. – Vol. 25. – P. 4–22.
- [15]. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders. / L.H. Han, J.A. Elliott, A.C. Bentham, et al. // International Journal of Solids and Structures. – 2008. – Vol. 45, №10. – P. 3088–3106.
- [16]. Павленко Д. В. Влияние параметров порошков титана на прочность спеченных полуфабрикатов / Д. В. Павленко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №2. – С. 87–92.
- [17]. ГОСТ 25280-90 Порошки металлические. Метод определения уплотняемости. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 15 с.
- [18]. Совершенствование технологических процессов и оснастки для деформирования порошковых заготовок с применением интенсивной пластической деформации / А. Ф. Тарасов, Я. Ю. Бейгельзимер, Д. В. Павленко, М. Б. Штерн // Обработка материалов давлением. – 2015. – №2 (41). – С. 336–344.
- [19]. Robertson I. M. Swelling during sintering of titanium alloys based on titanium hydride powder / I. M. Robertson, G. B. Schaffer // Powder Metallurgy. – 2010. – Vol 53. – №1. – P. 27–33.
- [20]. Цеменко В. Н. Процессы порошковой металлургии / Цеменко В. Н. Теория и физические основы уплотнения порошковых материалов. Санкт-Петербург: СПбГПУ. – 2005. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 28.05.2018

Павленко Д. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна
e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

ЗАКОНОМІРНОСТІ УЩІЛЬНЕННЯ ТИТАНОВИХ ПРЕСОВОК

Мета роботи. Встановлення основних закономірностей ущільнення порошків титану марки ПТ5 на етапах пресування та спікання, а також закономірностей розподілу пористості в спечених заготовках.

Методи дослідження. Титанові пресовки одержували шляхом холодного однобічного пресування порошків при різних тисках і наступного вакуумного спікання. Для дослідження пористості пресовок на основі порошку титану марки ПТ5 використовували метод гідростатичного зважування та аналізу мікрофотографій шліфів. Для обробки експериментальних даних використовували методи математичної статистики. Об'єктом дослідження був процес ущільнення титанових пресовок. Предметом дослідження були закономірності зміни щільності та пористості пресовок, а також їх геометричних розмірів залежно від тиску пресування.

Отримані результати. Приведені результати дослідження методом гідростатичного зважування розподілу пористості в циліндричних пресовках з порошку титану ПТ5 при однобічному холодному пресуванні та наступному вакуумному спіканні. Встановлено основні закономірності розподілу пористості в спечених пресовках та їх локальних частинах. Показано, що для пресовок діаметром 40 мм та висотою 70 мм мінімальне значення пористості після однобічного пресування при тиску 700 МПа та спікання при температурі 1250 °С протягом 2,5 ч. спостерігається в центральній верхній частині і

становить 4,5%. Максимальна пористість спостерігається в нижній частині, в периферійній зоні. Середнє значення пористості становить 8,8%, що свідчить про наявність переважно закритих пор. Показано, що розподіл пор у середній частині пресовок підкоряється закону нормального розподілу. На підставі дослідження щільності і геометрії пресовок після пресування з різними режимами та наступного вакуумного спікання, встановлено закономірності зміни пористості та розмірів. Показано, що при тиску пресування більше ніж 620...640 МПа наступне вакуумне спікання приводить до збільшення лінійних розмірів пресовок. Пресування при більш низькому тиску сприяє формуванню відкритої пористості, що забезпечує підвищення щільності при спіканні і усадці. На підставі встановлених закономірностей, обґрунтовано раціональний діапазон тиску пресування. Визначено параметр пресованості досліджених порошків і встановлено тиск пресування, при якому забезпечується одержання беспористої (компактної) пресовки. Показано, що, враховуючи ефекти появи вторинної пористості в процесі спікання, для одержання компактних спечених заготовок, які мають 100% щільність, технологічний процес повинен включати операції деформаційної обробки пресовок після спікання.

Наукова новизна. Встановлені закономірності зміни щільності, пористості та лінійних розмірів титанових пресовок залежно від тиску пресування з урахуванням консолідації вакуумним спіканням.

Практична цінність. На підставі встановленого розподілу пористості в циліндричних пресовках виконано аналіз пористості заготовок для вибору режимів інтенсивної пластичної деформації методом гвинтової екструзії. Встановлено раціональну величину тиску пресування, при якій забезпечується мінімальна зміна лінійних розмірів пресовок у процесі спікання.

Ключові слова: порошкова металургія; титан; пресовка; пресування; спікання; тиск; ущільнення; пористість; розмір.

Pavlenko D. V.

Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Aircraft Engines Technologies Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

REGULARITIES OF TITANIUM COMPACTS COMPACTION

Purpose. The purpose of this paper is to establish the main regularities of compaction of titanium powders of IT5 grade at the stages of pressing and sintering as well as regularities of porosity distribution in sintered billets.

Methodology. Titanium compacts were produced by cold single-sided pressing of powders at various pressures. The compacts were sintered in vacuum. Porosity of the compacts was investigated by hydrostatic weighing. Method of analyzing of microphotographs of thin sections was also used. Methods of mathematical statistics were used to process the experimental data. The object of study was the process of titanium compacts compaction. The subject of study were the regularities of density and porosity changes of compacts, as well as their geometric dimensions.

Findings. The results of study of the porosity distribution in cylindrical compacts of IT5 titanium powder with unilateral cold pressing and vacuum sintering are presented. The main regularities in porosity distribution in sintered compacts and their local parts are established. It is shown that for compacts with a diameter of 40 mm and a height of 70 mm the minimum value of porosity after single-sided pressing at 700 MPa and sintering at 1250 °C for 2.5 hours is observed in the central upper part. The porosity in this part of the compact is 4.5%. The maximum value of porosity is observed in the lower part of the peripheral zone of the compact. The average value of porosity is 8.8%. This indicates the presence of predominantly closed pores. It is shown that the distribution of pores in the middle part of the compacts obeys the law of normal distribution.

Based on the research of density and geometry of compacts after pressing at different modes and vacuum sintering, regularities in the change of porosity and size have been established. It is shown that at a compacting pressure of more than 620 to 640 MPa vacuum sintering leads to the increase in linear dimensions of the compacts. Compaction at the lower pressure promotes the formation of open porosity. This provides an increase in density during sintering and shrinkage. The rational range of compaction pressure is justified. The compressibility parameter of the observable powders is determined. Compacting pressure at which a non-porous compact can be obtained is established. It is shown that, taking into account the effects of the appearance of a secondary porous during sintering, to obtain the compact billets having a 100% density, the technological process should include deformation processing of compacts after sintering.

Scientific novelty. The regularities of density, porosity and linear dimensions change of titanium compacts are determined depending on the compaction pressure, taking into account vacuum sintering consolidation.

Practical value. Based on the established distribution of porosity in cylindrical compacts, the analysis of porosity of the billets for selection of the modes of intensive plastic deformation by twist extrusion is performed. A rational value of the compaction pressure which ensures a minimal change in linear dimensions of the compacts during the sintering process is established.

Keywords: powder metallurgy, titanium, compact, pressing, sintering, pressure, compaction, porosity, size.

REFERENCES

- [1]. Ivasishin O. M., Savvakina D. G., Bondareva, K. A., (2005) Proizvodstvo titanovykh splavov i detalei ekonomichnym metodom poroshkovoi metallurgii dlya shirokomasshtabnogo promyshlennogo primeneniya. *Nauka ta innovatsii*, 1(2), 44–57.
- [2]. Jackson M. (2007) Titanium – 21st century. *Materials world*, 3, 32–34.
- [3]. Zheng Chen G. (2013, 19-20 March) The FFC cambridge process for metal production: principle, practice and prospect: 3rd International Slag Valorisation Symposium transition to sustainable materials management. 217–233.
- [4]. Laptev A. Vyal, O. Bram, M. Buchkremer, H. P. Stover D. (2005) Green strength of powder compacts provided for production of highly porous titanium parts. *Powder Metallurgy*, 48(4), 358–364.
- [5]. Bridzhmen P. (1955) Issledovanie bol'shikh plasticheskikh deformatsij i razryva. Moscow, 444.
- [6]. CODA (2018) Innovatsionnye tekhnologicheskie resheniya Retrieved from <http://www.kodamet.com>.
- [7]. Ivasishin O. M., Bondareva K. A., Bondarchuk V. I. (2004) Soprotivlenie ustalosti splava Ti-6Al-4V, poluchennogo metodom poroshkovoi metallurgii. *Problemy prochnosti*. 3, 5–13.
- [8]. Bratukhina A. G., Yazova G. K., Karaseva B. E. (Eds) (1997) *Sovremennye tekhnologii v proizvodstve gazotur-binnykh dvigatelei*, Moscow, Mashinostroenie, 416.
- [9]. Matthieu Bardet (2014) Processing of titanium-based composite materials with nanosized TiC and TiB reinforcements using different powder metallurgy processes: hydrogenation/dehydrogenation sintering, and severe plastic deformation (Equal Channel Angular Pressing: ECAP). *Material chemistry*. University de Bordeaux.
- [10]. Pavlenko D.V. (2017) Metodologiya obrabotki davleniem spechennykh splavov pri izgotovlenii detalei gazoturbinnykh dvigatelei, *Vestnik dvigatelestroeniya*, 1, 83–92.
- [11]. Kuz'mov A. V., Shtern M. B., Kirkova E. G., Beygel'zimer Ya. E., Pavlenko D. V. (2016) Analysing the twist extrusion of porous blanks using modified theories of plasticity for porous bodies. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 54 (11–12), 631–640.
- [12]. Vamsi Krishna B., Venugopal P., Prasad Rao K. (2004) Inferences on plastic properties and coefficient of friction during simultaneous compression deformation of dissimilar sintered powder metallurgical preforms. *Materials Science and Technology*, 20(3), 322–334.
- [13]. Compacting of metal powders (2018) Retrieved from <https://mail.pk.edu.pl/~mnykiel/iim/KTM/MP/DOWNLOAD/pdf/CHAPT04.PDF>.
- [14]. Sinka. I.C. (2007) Modelling Powder Compaction. *KONA*. 25, 4–22.
- [15]. Han L.H., Elliott J.A., Bentham A.C., Mills A., Amidon G.E., Hancock B.C. (2008) A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders. *International Journal of Solids and Structures*, 45(10), 3088–3106.
- [16]. Pavlenko D.V. (2014) Vliyanie parametrov poroshkov titana na prochnost' spechennykh polufabrikatov. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2, 87–92.
- [17]. GOST 25280-90 Poroshki metallicheskie. Metod opredeleniya uplotnyaemosti. Moscow: Izd-vo standartov, 1991, 15.
- [18]. Tarasov A. F., Beigel'zimer Ya. Yu., Pavlenko D. V., Shtern M. B. (2015) Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov i osnastki dlya deformirovaniya poroshkovykh zagotovok s primeneniem intensivnoi plasticheskoi deformatsii. *Obrabotka materialov davleniem*, 2(41), 336–344.
- [19]. Robertson I. M., Schaffer G. B. (2010) Swelling during sintering of titanium alloys based on titanium hydride powder. *Powder Metallurgy*, 53 (1), 27–33.
- [20]. Tsemenko V. N. (2005) Protessy poroshkovoi metallurgii. *Teoriya i fizicheskie osnovy uplotneniya poroshkovykh materialov* Sankt-Peterburg: SPBGPU.