

УДК 621.7.043: 62.253.5

Канд. техн. наук Д. В. Павленко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ СПЕЧЕННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*На основании классификации методов обработки металлов давлением, предложена методология выбора деформационных способов обработки при проектировании технологических процессов изготовления деталей ГТД из спеченных сплавов. Показано, что рациональным является применение методов интенсивной пластической деформации в сочетании с традиционными способами деформации, а также применение отделочно-упрочняющих методов обработки на финишных этапах технологического процесса. Выполнен анализ рациональных параметров обработки.*

**Ключевые слова:** титановый сплав, спеченный полуфабрикат, лопатка, газотурбинный двигатель, методы обработки давлением, винтовая экструзия, технология.

### Введение

Обработка металлов давлением (ОМД) является одним из важнейших этапов в перспективных, ресурсосберегающих технологических процессах (ТП) изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из спеченных сплавов [1]. В настоящее время большое внимание уделяется интенсивно развивающимся методам интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов. Например, в работах [2, 3] приведены результаты анализа и систематизации современных методов и штамповой оснастки для процессов ИПД компактных материалов. Установлены перспективные направления для дальнейшего совершенствования схем технологических процессов и оснастки для реализации ИПД. Анализ существующих деформационных методов измельчения структуры материалов приведен также в работах [4, 5]. Основной целью применения методов ИПД является формирование субмикроструктурной структуры материала, и таким образом, повышения комплекса физических, механических и специальных свойств [6, 7 и др.]. Общей чертой этих, и ряда других исследований является то, что особенности методов ИПД рассматриваются применительно к обработке компактных материалов. Исследования, посвященные систематизации методов обработки давлением некомпактных материалов, а также разработке методологии построения технологических процессов изготовления деталей ГТД из спеченных сплавов, являются весьма ограниченными. В то же время в отличие от применения методов ОМД при изготовлении деталей из компактных материалов, в которых они используются для формообразования на заготовительном этапе ТП и в качестве отделоч-

но-упрочняющих методов, применение методов ОМД для спеченных сплавов приобретает еще один важный аспект — уплотнение.

Целью настоящей работы являлась разработка методологии выбора методов обработки давлением спеченных сплавов на основных этапах технологического процесса изготовления деталей ГТД. Для ее достижения были решены задачи, связанные с выбором и анализом критериев и целей применения методов ОМД на основных этапах ТП, их классификации, а также разработки алгоритма выбора рациональных методов деформации на основных этапах ТП.

### Результаты исследования и их анализ

Анализ целей применения методов ОМД для спеченных сплавов в полном технологическом цикле изготовления деталей ГТД — от обработки заготовки после спекания до обработки готовой детали показывает, что основными из них являются:

— получение полуфабрикатов сплавов, которые довольно трудно или вообще невозможно получить другими методами. Например, композиций металлов, которые не смешиваются в расплавленном виде; прецизионных сплавов с очень малым содержанием примесей, а также с точным соответствием составу по всему объему; полуфабрикатов с заданным распределением химического состава по объему и т. д.;

— получение полуфабрикатов с низкой себестоимостью, по структуре и свойствам приближающихся к деформированным полуфабрикатам, получаемым по технологии переплава и последующей деформационной обработке;

— формообразование заготовок деталей ГТД из полуфабрикатов;

– упрочнение поверхностного слоя окончательно формобразованных поверхностей.

Каждая из указанных выше целей достигается на соответствующем этапе ТП, задачами для которого являются:

*на этапе получения деформированных полуфабрикатов:*

- устранение пористости и обеспечение прочных связей между частицами порошка;
- дробление структурных элементов;
- гомогенизация химического состава;

*на этапе получения заготовки деталей ГТД:*

– формообразование основных поверхностей детали;

*на этапе отделочно-упрочняющей обработки:*

- создание в поверхностном слое наклепанного слоя;
- формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

Многообразие целей и задач применения методов ОМД предопределяет различные критерии к их реализации на каждом из этапов ТП (рис. 1). В свою очередь это приводит к многообразию применяемых методов ОМД.

Этап ТП устранения пористости и формирования структуры материала стандартного типа, с размерами структурных элементов соответствующих требованиям нормативной документации [8], является одним из наиболее важных в ТП изготовлении деталей ГТД на основе методов порошковой металлургии. В работе [9] показано, что рациональным является не достижение в процессе деформации структуры стандартного типа, а формирование субмикроструктурной структуры (СМК) с размером зерен порядка 250...400 нм. Полуфабрикаты со структурой, отвечающей требованиям нормативов, например, жаропрочных титановых сплавов, используемых для изготовле-

ния лопаток ГТД, получают из полуфабрикатов с СМК структурой путем последующей термической обработки. Такая технологическая схема позволяет наряду с обеспечением структуры стандартного типа устранять разнородность материала, возникающую в процессе операций ОМД, и уменьшать количество технологических переходов [10]. Основными проблемами при обработке давлением спеченных заготовок из титановых сплавов на этом этапе ТП являются разрушение, образование дефектов типа флокенов, а также ликвации легирующих элементов. Отмеченные дефекты приводят к снижению прочностных свойств заготовок, что является препятствием для их применения при изготовлении ответственных деталей ГТД, например, лопаток статора и ротора компрессора.

Для достижения поставленных целей, на этапе уплотнения спеченных заготовок, может быть применен широкий спектр известных методов обработки давлением. Основными из них являются:

- свободная ковка (К) [11];
- штамповка (Ш) [12];
- экструзия (Э) [13];
- гидроэкструзия (ГЭ) [14];
- выдавливание (В) [15];
- прокатка (П) [16];
- фасонный прокат (ФП) [17];
- вальцевание (ВЛ) [18];
- равноканально-угловое прессование (РКУП) [19];
- винтовая экструзия (ВЭ) [20];
- реверсивный сдвиг (РС) [21];
- гидростатическая обработка (ГС) [22];
- прессование в оболочке (ПО) [23];
- отделочно-упрочняющие методы обработки (ультразвуковое упрочнение (УЗУ), пневмодробеструйное упрочнение (ПДУ) [24]).



Рис. 1. Критерии применения методов ОМД на различных этапах технологического процесса изготовления деталей ГТД

Условно методы ОМД, применяемые для изготовления лопаток компрессора ГТД, могут быть разделены на четыре группы:

- традиционные (К, Ш, Э, П, ПО, ФП, В, ВЛ) – 1 группа;
- «легкие» ИПД (ГС, ГЭ, ГС) – 2 группа;
- «тяжелые» ИПД (ВЭ, РКУП) – 3 группа;
- отделочно-упрочняющие (УЗУ, ПДУ) – 4 группа.

Анализ классификатора методов деформации спеченных заготовок (рис. 2) указывает на их неоднозначность, что предопределено возможностью реализации некоторых из них в различных условиях. Так, например, свободная ковка, штамповка, прокатка и ряд других методов могут быть реализованы в широком диапазоне температур. В зависимости от геометрических характеристик заготовки и оболочек метод прессования в оболочке может обеспечивать как высокий, так и

низкий уровень гидростатической компоненты напряжений в очаге деформации. Такая неоднозначность с одной стороны затрудняет выбор метода обработки, однако с другой стороны значительно расширяет круг возможных методов при их комплексном применении. Очевидно, что для достижения поставленных целей на рассматриваемом этапе ТП возможно использование как одного метода ОМД, так и их комбинации.

На этапе уплотнения спеченных заготовок поставленная цель может быть достигнута путем использования методов, обеспечивающих обработку без формоизменения заготовки, с высоким уровнем гидростатической компоненты напряженного состояния, обеспечивающих проработку всего объема заготовки, приводящих к измельчению структуры материала и способствующих гомогенизации его химического состава. Основываясь на разработанном классификаторе можно

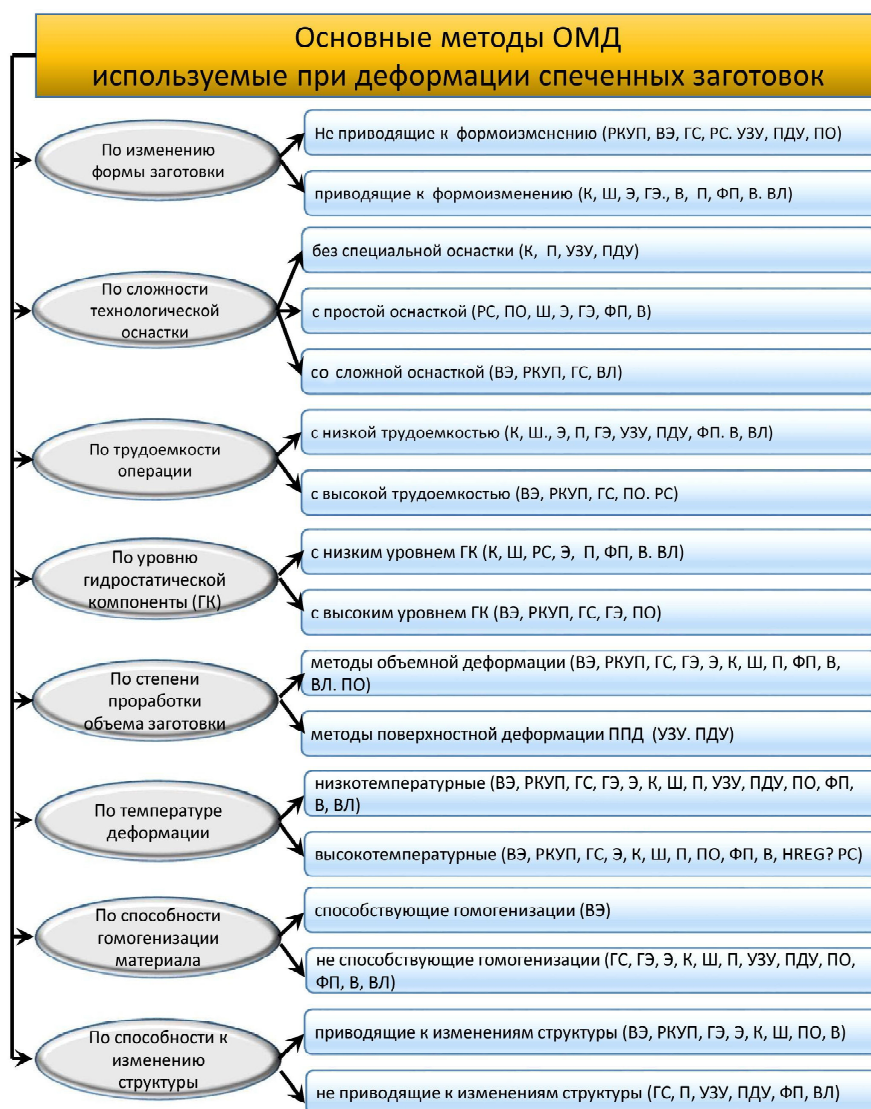


Рис. 2. Классификация основных методов ОМД, применяемых для изготовления деталей ГТД из спеченных заготовок

видеть (рис. 2), что указанным критериям отвечает метод ВЭ, при котором реализуется деформация материала простым сдвигом. Деформация методом РКУП обеспечивает выполнение большей части требований, предъявляемых к методу обработки спеченных заготовок на данном этапе ТП, однако она не обеспечивает гомогенизацию материала, что обусловлено принципиальными отличиями деформации при ВЭ и РКУП. В работах Бейгельзимера Я. Е. было показано, что для обеспечения однородного распределения легирующих элементов во всем объеме, необходимо создать в заготовке так называемый простой сдвиг [25]. В работе [26] показано, что при деформации по схеме простого сдвига в заготовках возникают вихревые потоки материала, в определенном смысле аналогичные турбулентным движениям жидкости. Следствием вихревых потоков материала при простом сдвиге являются веретенообразные продукты износа, возникающие в зоне контакта двух твердых тел при их трении между собой [27]. Указанные вихревые потоки переносят легирующие элементы в сплав, создавая их однородное распределение по объему. При чистом сдвиге, характерном для РКУП, вихревые потоки не образуются.

Таким образом, применение метода РУПУ на данном этапе ТП возможно, однако такое техническое решение предопределяет наличие в ТП последующей энергозатратной операции гомогенизирующего отжига, обеспечивающего снятие внутренних напряжений и уменьшение неоднородности заготовки по структуре и химическому составу.

В литературе приведены результаты, свидетельствующие об эффективности применения, например ВЭ [28] и РКУП [19] в качестве основных методов для решения всего комплекса задач, связанных с ОМД спеченных заготовок. Однако, эти методы характеризуются высокой стоимостью технологической оснастки и трудоемкостью, что делает их применение нерациональным с точки зрения экономической составляющей ТП. Очевидно, что для различных состояний спеченных заготовок характерны различные механические свойства, что предопределяет возможность применения различных методов ОМД. Таким образом, достижение указанных целей может быть реализовано путем построения ТП, основанного не на одном, универсальном, методе обработки, а на их последовательном сочетании. Для разработки методологии построения таких ТП необходимо с одной стороны проследить эволюцию свойств спеченных заготовок в процессе деформации, а с другой — изучить особенности явлений, протекающих в заготовке.

В работе [27] было показано, что упрочнение спеченных титановых заготовок в процессе де-

формации винтовой экструзией происходит в несколько стадий. На первой стадии устраняется пористость, происходит уплотнение материала. На второй стадии реализуется деформационное упрочнение, характеризующееся повышением плотности дефектов кристаллической решетки. Третья стадия характеризуется насыщением, характерным для данного метода обработки. Таким образом, на первых операциях обработки давлением заготовка является некомпактным телом и для сохранения ее целостности необходимо применять методы ОМД, характеризующиеся высоким уровнем гидростатической компоненты напряженного состояния в очаге деформации. К таким методам могут быть отнесены различные методы ИПД (рис. 2) условно отнесенные к третьей группе методов ОМД. На начальных стадиях деформации необходимо обеспечить и условия гомогенизации химического состава во всем объеме заготовки, что может быть обеспечено в процессе деформации ВЭ [27]. Таким образом, несмотря на высокую стоимость технологической оснастки и достаточно высокую трудоемкость деформации методом ВЭ, он обеспечивает наиболее рациональные условия обработки спеченных заготовок на начальном этапе ТП. Альтернативным является применение других методов ИПД, обеспечивающих высокий уровень гидростатической компоненты, например, РКУП, ГЭ, ГС. Однако в этом случае задача обеспечения гомогенности состава заготовок должна быть решена на этапе получения спеченной заготовки или путем последующей энергозатратной операции гомогенизирующего отжига. Несмотря на то, что методы деформации ГЭ и ГС обеспечивают высокий уровень гидростатической компоненты в очаге деформирования и, в связи с этим, могут быть использованы на начальном этапе уплотнения спеченных заготовок, результаты исследований, показанные в работах [28, 30] свидетельствуют о неэффективности их применения для объемных спеченных и порошковых заготовок.

Применение на начальном этапе ТП методов ОМД, характеризующихся низкой себестоимостью за счет применения простой технологической оснастки и относительно невысокой трудоемкости, например, таких как свободнаяковка, штамповка и других, является нерациональным т.к. в этом случае обработка без разрушения возможна только в области высоких температур. Так, например, для жаропрочного сплава ВТ6 температура начала деформации при ковке оставляет 1100 °С, а температура окончания деформации 850 °С [31]. Это приводит к существенному увеличению затрат энергетических ресурсов, по сравнению с деформацией методами ИПД, что связано с необходимостью многократного нагрева заготовок до высоких температур, а также со сни-

жением коэффициента использования материала за счет необходимости удаления дефектного слоя — окалины и газонасыщенного поверхностного слоя. При этом, учитывая, что на данном этапе ТП деформации подвергается некомпактная, спеченная заготовка с развитым поровым пространством, возникает опасность образования окалины и газонасыщенного слоя не только на наружной поверхности заготовки, но и на внутренних поверхностях пор, что негативно сказывается на прочностных характеристиках получаемых сплавов. Применение таких методов деформации также не способствует гомогенизации, так как не приводит к явлениям перемешивания материала в объеме заготовки собственным, например, винтовой экструзии [27].

На стадии деформационного упрочнения заготовки она представляет собой компактное тело с нулевой, или близкой к нулевой, пористостью. В этом случае для обработки могут быть применены широкий спектр методов ОМД. Основными условиями выбора является снижение затрат на их реализацию и эффективное дробление структурных составляющих. Учитывая указанные выше критерии на данной стадии наиболее рациональным является применение метода РС, обеспечивающего формирование субмикроструктурной структуры материала при относительно низких технологических затратах и сохранении формы заготовки. Альтернативным является также применение других методов первой и второй группы (ИПД).

Задачей последней стадии деформирования является упрочнение материала заготовки и получение полуфабриката, геометрия которого близка к геометрии заготовки детали. При этом следует отметить необходимость применения на данной стадии методов деформации, в которых реализуется отличная от предыдущих схема деформации материала. Явление деформационного насыщения металла при обработке методами ИПД описано в работе [32]. Исследования, приведенные в работе [33], также указывают на способность материалов в субмикроструктурном состоянии к эффективному деформационному упрочнению, что указывает на рациональность применения дополнительных методов деформационной обработки после ИПД. В работе [34] отмечается, что применение для заготовок, подвергнутых ВЭ, при котором реализуется схема деформации простым сдвигом, последующей обработки прокаткой, при которой реализуется схема деформации чистым сдвигом, позволяет существенно повысить их прочностные характеристики. При этом прокатка, за счет особенности деформации с формоизменением, позволяет также обеспечить геометрию полуфабриката, близкую к геометрии заготовки, например, лопатки ком-

прессора ГТД. Альтернативными на данной стадии ТП могут быть другие методы, реализующие процесс деформации чистым сдвигом и характеризующиеся невысоким уровнем затрат, например, свободная ковка, штамповка, экструзия и т. д. Основным критерием их реализации должно являться условие сохранения сформированной на предшествующих операциях ОМД субмикроструктурной структуры, что обеспечивается проведением деформации в низкотемпературной области. Такими же ограничениями должны отвечать методы, применяемые для формообразования поверхностей на этапе получения заготовки деталей. На этап отделочно-упрочняющей обработки поверхностей детали ГТД применяют исключительно отделочно-упрочняющие методы обработки, не приводящие к изменению их геометрии.

Анализ структурной схемы методологии алгоритма выбора рациональных методов ОМД, применяемых на основных этапах ТП ресурсосберегающей технологии изготовления деталей ГТД из спеченных полуфабрикатов показывает (рис. 3), что существует достаточно большое количество альтернативных вариантов построения ТП изготовления деталей, например, лопаток ГТД. Так, возможны реализации вариантов ТП по схеме ВЭ-ВЭ-ВЭ-ФП-УЗУ или РКУП-ВЭ-К-В-ПДУ и ряд других. При этом для каждого из этапов предопределен набор альтернативных методов деформационной обработки, выбор которых должен определяться, исходя из доступного технологического оборудования и оснастки. При этом методы 3-й группы могут быть использованы на всех этапах ТП. Однако такая схема ТП в серийном производстве не является рациональной с точки зрения экономического аспекта и не позволяет в полной мере реализовать потенциал прочности материала детали. Общей закономерностью выбора метода обработки является необходимость снижения температуры деформации по ходу ТП, что обусловлено сохранением сформированной на предшествующих операциях структуры материала.

Одним из важных аспектов при разработке технологии изготовления лопаток ГТД из спеченных сплавов является не только рациональный выбор методов обработки и их последовательности, но и назначение режима обработки. Особенности назначения режимов технологических операций ОМД спеченных заготовок заключаются в том, что на первых этапах ТП обработки подвергают некомпактный материал, который, в отличие от компактного, может как пластически деформироваться, так и уплотняться. На последующих этапах ТП деформации подвергают материал, в котором сформирована субмикроструктурная структура, что также накладывает ограничения на режимы обработки.



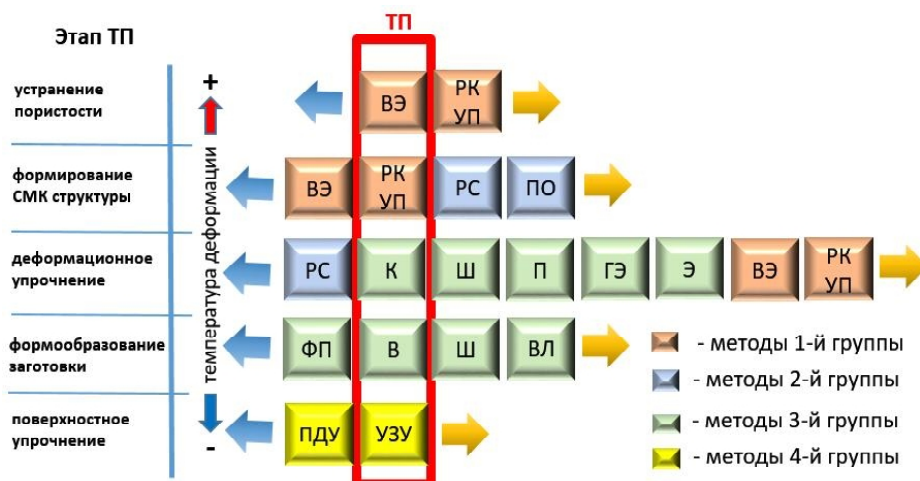


Рис. 3. Структурная схема алгоритма выбора методов ОМД при изготовлении лопаток ГТД из спеченных заготовок

На этапе ТП, связанном с устранением пористости, основной задачей является деформация заготовки при минимальной температуре без ее разрушения. Выполнение этого условия обеспечивает снижение затрат энергетических ресурсов, а также приводит к повышению долговечности штамповой оснастки и исключает появления дефектов материала, связанных с термическим воздействием. Назначение рациональных режимов ОМД на данном этапе возможно, основываясь на континуальную модель поведения некомпактного материала и с применением методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки. Моделирование поведения заготовок, например в системе Abaqus, позволяет оценивать изменение не только такого параметра как пористость, но и накопленную деформацию твердой фазы, что является важным при назначении режимов деформирования и проектирования технологической оснастки [35]. Использование моделей поведения спеченных титановых сплавов в комплексе с численным моделированием процесса их ИПД методом ВЭ позволили установить рациональные режимы обработки: размер заготовки – 28×18 мм, начальная пористость – 79%, угол закрутки винтового канала – 30 °С, температура начала деформации – 750 °С, количество циклов деформации для получения заготовки с компактной, СМК структурой – 5. Для уплотнения заготовки, при котором ее можно в дальнейшем рассматривать как компактное тело, достаточно выполнить 13 циклов деформации ВЭ. Однако, для гомогенизации легирующих элементов в сложнотитановых сплавах и формирования СМК структуры необходимо последующее применение методов ОМД 2-й группы и термической обработки. Одним из вариантов рациональной, с точки зрения обеспечения качества и производитель-

ности процесса, для спеченных заготовок является комплексная технология ИПД, включающая операции винтовой экструзии, реверсивного сдвига иковки (рис. 4).

Как было указано выше, режимы операций ОМД 3-й и 4-й групп необходимо назначать, руководствуясь условием сохранения СМК структуры материала. Так, например, в работе [36] приведены результаты исследования структуры и свойств жаропрочного титанового сплава ВТ8М-1 в субмикроструктурном состоянии, подвергнутого термическому воздействию. Показано, что рабочая температура деталей из сплава с субмикроструктурной структурой не должна превышать 550 °С, а температура отжига для формирования структуры стандартного типа составляет 650 °С. Исходя из установленных закономерностей можно сделать вывод, что температура нагрева заготовок в процессах ОМД 3-й и 4-й групп также не должна превышать 550 °С, что обеспечит сохранение сформированной СМК структуры. Применение методов ОМД при более высоких температурах, например при выдавливании пера лопаток, реализуемом при температуре для указанного сплава 820 °С, вероятно будет приводить к росту зерен.

Анализ условий применения методов ОМД к заготовкам из некомпактных материалов позволил установить возможные и рациональные методы обработки в зависимости от состояния заготовки (рис. 5).

При назначении степени деформации на этапе формообразования заготовки необходимо также учитывать особенности деформации сплавов в СМК состоянии, связанные с разнотекучностью материала и его технологической пластичностью. Результаты исследования, приведенные в работах [10, 37] показывают, что применение на ранних этапах ТП методов ИПД позволяет су-

шественно увеличить допустимую степень деформации заготовки без опасности ее разрушения и появления крупных, рекристаллизованных зерен вследствие последующего термического воздействия. Увеличение допустимой степени деформации благоприятно сказывается на снижении затрат энергетических ресурсов при производстве лопаток, так как позволяет сократить количество необходимых технологических переходов.

Режимы отделочно-упрочняющих операций, учитывая результаты, полученные в работе [33], свидетельствующие о равенстве коэффициентов деформационного упрочнения титановых сплавов с СМК и крупнокристаллической структурами, должны соответствовать аналогичным значениям, применяемым для операций УЗУ и ПДУ в существующих ТП изготовления лопаток компрессора [24].

Таким образом, классификация и систематизация методов обработки давлением спеченных титановых сплавов, полученных на основе методов порошковой металлургии, применительно к особенностям изготовления таких деталей ГТД как лопатки компрессора, позволили разработать методологию алгоритма построения схемы технологического процесса их изготовления и выбора рациональных методов обработки. Установлено, что на первых этапах технологического процесса рациональным является применение метода винтовой экструзии для устранения пористости и гомогенизации материала, с последующим применением для формирования СМК структуры менее трудоемких и более производительных методов ИПД, таких как реверсивный сдвиг, всесторонняя ковка, прессование в оболочке и т.д.

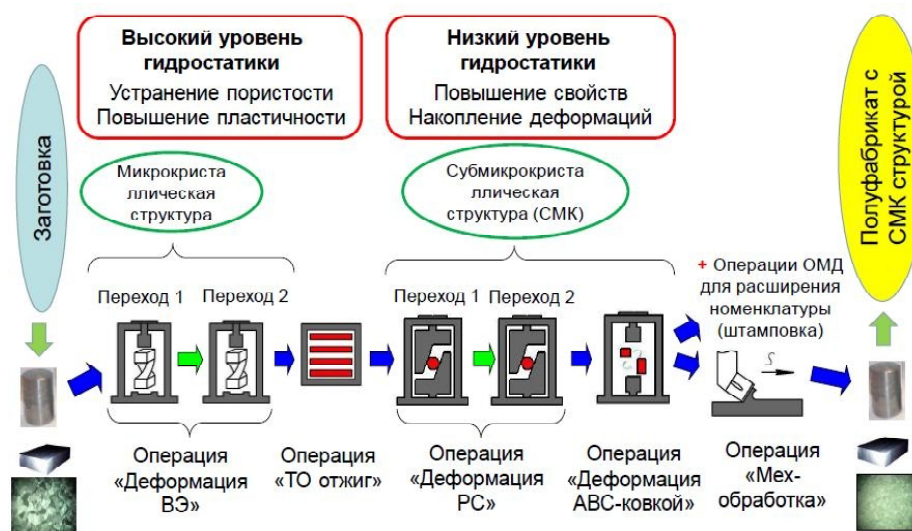


Рис. 4. Комплексная технология ИНД спеченных заготовок

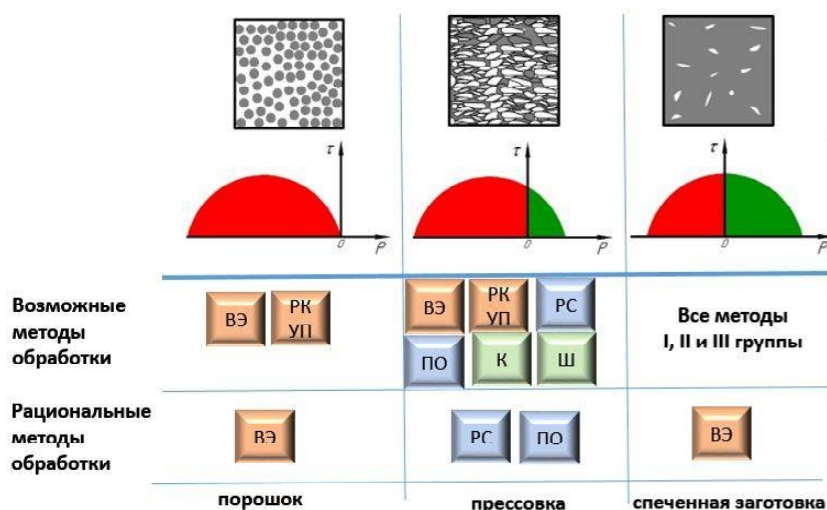


Рис. 5. Методы обработки давлением порошковых заготовок при различной степени связанности частиц

Для формообразования заготовок лопаток ГТД и отделочно-упрочняющей обработки их аэродинамических поверхностей рациональным является применение широкого круга методов ОМД при температуре, не превышающей температуру начала рекристаллизации сплава и более высокой, по сравнению с обработкой крупнокристаллических сплавов, степени деформации.

#### Список литературы

1. Павленко Д. В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов / Д. В. Павленко // Технологические системы. — 2013. — №4 (65). — С. 21–29.
2. Алтухов А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // Письма о материалах. — 2012. — Т. 2. — №1. — С. 54–59.
3. Периг О.В. Систематизація процесів інтенсивного пластичного деформування (ІПД) об'ємних заготовок на основі онтологічного підходу / Периг О.В., Тарасов О.Ф., Алтухов О.В. // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2012. — №46. — С. 83–89.
4. Столяров В. В. Деформационные методы измельчения структуры / В. В. Столяров // Вестник научно-технического развития. — 2013. — №4 (68). — С. 29–36.
5. Колесников А. Г. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов / А. Г. Колесников, А. С. Шинкарев // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. — 2014. — №11. — С. 34–44.
6. Валиев Р.З., Александров П. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. — М.: ИКЦ Академкнига. — 2007. — 398 с.
7. Использование интенсивных пластических деформаций для получения объемных наноструктурных металлических / Валиев Р. З., Еникеев Н. А., Мурашкин М. Ю., Утяшев Ф. З. // Изв. РАН. МТТ. — 2012. — № 4. — С. 109–122.
8. ГОСТ 26492-85 Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия введ. 1987-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 31 с.
9. Формирование структуры и механических свойств при термообработке субмикроструктурных (a+v)-титановых сплавов / В. Г. Шевченко, Т.А. Глотка Т.А., Т.А. Коваленко Т.А. и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. под ред. В. И. Большакова. — Вып. 64. — Днепропетровск: ПГАСА, 2012. — С. 453–457.
10. Устранение разнородности в лопатках компрессора ГТД интенсивной пластической деформацией / В. А. Богуслаев, В. Ю. Коцюба, Д. В. Павленко, Д. В. Ткач // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научных трудов. Вып. 80. — Дн-вск.: ПГАСА, 2015. — С. 373–379.
11. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах / Под ред. Е. И. Семенова. — М.: Машиностроение, 1985. — Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. — 285 с.
12. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудования // Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков и др. — М.: Машиностроение, 1991. — 320 с.
13. Луговской В. Новые методы обработки материалов жидкостью сверхвысокого давления / В. Луговской, Г. Данилов [Электронный ресурс] Режим доступа на 01.01.2016 <http://www.elektron2000.com/article/1188.html>
14. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков и др. // Физика и техника высоких давлений. — 1999. — №3. — С. 109–111.
15. Упруго-пластическое деформирование спеченных пористых материалов в процессах обработки давлением П. Особенности деформирования пористых заготовок при штамповке выдавливанием. М. Горохов, Е. А. Дорошкевич, Е. В. Звонарев и др. [Электронный ресурс] Режим доступа на 01.01.2016 <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/15891>
16. Куприн М. И. Основы теории прокатки / Куприн М. И., Куприна М. С. — М.: Металлургия, 1978. — 184 с.
17. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. — г. Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. — 396 с.
18. Атрошенко А. П. Технология горячей вальцовки / Атрошенко А. П. — М.: Машиностроение, 1969. — 176 с.
19. Эволюция распределения плотности при равноканальном угловом прессовании пористых заготовок / А. П. Майданюк, Л. А. Рябичева, М. Б. Штерн, Г. А. Баглюк // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2008. — №6. — ч. 1. — С. 213–216.



20. Винтовая экструзия — процесс накопления деформаций / Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. — Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. — 87 с.
21. Тарасов А. Ф. Моделирование процесса интенсивного пластического деформирования заготовок по схеме реверсивного сдвига / А. Ф. Тарасов, А. В. Алтухов // Металлургические процессы и оборудование. — 2013. — №4. — С. 47–54.
22. Реут О. П. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов / Реут О. П., Богинский Л. С., Петюшик Е. Е. — Минск: «Дэбор», 1998. — 258 с.
23. Исследование процесса осадки спеченного цилиндра при различных контактных условиях / Г. Л. Петросян, Л. А. Азарян, А. М. Арустамян, А. К. Карапетян // Вестник ГИУА. Серия «Механика, машиноведение, машиностроение». — 2014. — Вып. 17, №2. — С. 32–41.
24. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др. — Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2005. — 559 с.
25. Патент РФ №2460600 МПК B21C 23/04 B21J 5/06 C22F 1/00 Способ прессования профилей из металлических сплавов / Я. Е. Бейгельзимер, Д. В. Варюхин, Р. Ю. Кулагин № 2011106960/02. — заявл. 24.02.2011 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. №25.
26. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я. Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений. — 2008. — Т. 18. — №4. — С. 77–85.
27. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Боуден Ф. П., Тейбор Д. — М. : Машиностроение, 1968. — 543 с.
28. Павленко Д.В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения. — 2015. — №1. — С. 87–93.
29. Павленко Д. В. Вихри в некомпактных заготовках при деформации винтовой экструзией / Д. В. Павленко Я. Е. Бейгельзимер // Порошковая металлургия. — 2015. — №9/10. — С. 12–22.
30. Павленко Д.В. Уплотнение спеченных титановых заготовок гидроэкструзией / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников // Вестник двигателестроения. — 2016. — №1. — С. 58–61.
31. Обработка титановых сплавов давлением / Мажарова Г. Е., Комановский А. З., Чечулин В. Б., Важецин С. Ф. — М. : Металлургия, 1977. — 96 с.
32. Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation / R. Pippan, S. Scheriau, A. Taylor etc. // Annual Review of Materials Research. — 2010. — Vol. 40. — P. 319–343.
33. Павленко Д. В. Упрочняемость сплава BT1-0 в субмикроструктурном состоянии при сжатии / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения — 2012. — №1. — С. 161–168.
34. Измельчение микроструктуры и механические свойства титана, подвергнутого винтовой экструзии и последующей прокатке / Я.Е. Бейгельзимер, В.В. Столяров, Д.В. Орлов, Р.З. Валив // Физика металлов и материаловедение. — 2005. — Т. 99. — №2. — С. 92–99.
35. Анализ винтовой экструзии порошковых заготовок методами модифицированных теорий пластичности пористых тел / А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн, Е.Г. Киркова и др. // Порошковая металлургия. — 2015. — №11/12. — С. 3–14.
36. Павленко Д. В. Влияние термического воздействия на структуру и свойства титанового сплава BT8M в субмикроструктурном состоянии / Д. В. Павленко, Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // Технологические системы. — 2016. — №1. — С. 60–67.
37. Павленко Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов / Д. В. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. — 2015. — Вип. 15. — С. 1–14.

Поступила в редакцию 22.03.2017

#### **Павленко Д.В. Методологія обробки тиском спечених сплавів при виготовленні деталей газотурбінних двигунів**

*На підставі класифікації методів обробки металів тиском, запропоновано методологію вибору деформаційних способів обробки при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей ГТД зі спечених сплавів. Показано, що раціональним є застосування методів інтенсивної пластичної деформації в комбінації із традиційними способами деформації, а також застосування оздоблювально-зміцнюючих методів обробки на фінішних етапах технологічного процесу. Виконано аналіз раціональних параметрів обробки.*

**Ключові слова:** титановий сплав, спечений напівфабрикат, лопатка, газотурбінний двигун, методи обробки тиском, гвинтова екструзія, технологія.

**Pavlenko D. The methodology of pressure treatment sintered alloys the manufacture of parts of gas turbine engines**

*The methodology for the selection of the deformation processing methods for development of technological processes of manufacturing parts GTE sintered semi processed materials was proposed on the base of pressure treatment materials classification. It is shown that usage of methods of severe plastic deformations in combination with conventional pressure treatment methods and also application of finishing and strengthening treatment methods on the finishing stages of the process is rational. The analysis of the rational processing is done*

**Key words:** titanium alloy, sintered billet, blade, gas turbine engine, forming methods, twist extrusion, technology.