

Машеков С.А., Нурахметова К.К.

ПРОБЛЕМЫ ШТАМПОВКИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

S.A. Mashekov, K.K. Nurakhmetova

PROBLEMS OF STAMPING TURBINE BLADES MADE OF TITANIUM ALLOYS AND WAYS OF SOLUTIONS

УДК: 669.35.074.669.539.5

В данной статье рассматриваются проблемы штамповки поковок типа турбинные лопатки из титановых сплавов. Для изготовления высококачественных турбинных лопаток из титановых сплавов рекомендуется использовать совмещенный процесс обработки металлов давлением, как протяжка в комбинированных бойках и на радиально – ковочной машине и высадку в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности.

Ключевые слова: титановые сплавы, штамповка, ковка, бойки, инструмент.

The important task of industrial upgrading is development and implementation of innovative technologies forging and stamping titanium alloys that improve quality, expand the range of semi-finished products and reduce energy consumption.

In an article for the manufacture of high-quality turbine blades made of titanium alloys is recommended to use the combined processes of metal forming as broaching in combined strikers and radial forging machine.

To obtain high-quality forgings recommended in planting to use tool with changing shape of the working surface.

Key words: titanium alloys, stamping, forging, strikers tool.

Турбинные и компрессорные лопатки являются одной из наиболее важных деталей в машиностроении [1,2,3]. Они работают в сложных эксплуатационных условиях высоких статических и динамических нагрузок, эрозионных и коррозионных воздействий и т.п. Именно они во многом определяют ресурс и надежность газотурбинного двигателя (ГТД). Лопатки турбин и компрессоров имеют значительные перепады площадей поперечного сечения на участке замок-перо, что затрудняет их изготовление [4]. По оценкам специалистов [5] трудоемкость изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей составляет до 30 % от трудоемкости изготовления всего изделия. В настоящее время в производстве лопаток турбин и компрессоров применяются различные технологии [5]. Все эти технологии имеют свои преимущества и недостатки.

Титановые сплавы (BT6, BT3-1) являются наиболее распространенными материалами для изготовления лопаток турбин и компрессора ГТД из-за их высокой удельной прочности и коррозионной стойкости [2]. Однако стандартный уровень прочности титановых полуфабрикатов, выпускаемых современной промышленностью стран СНГ обычно варьируется от 850 до 1100 МПа. Традиционной технологией получения заготовок лопаток из титановых сплавов, имеющих достаточно сложную поверхность

конфигурацию, является объемная штамповка, в том числе изотермическая в условиях сверхпластической деформации [6]. Штампованные лопатки из сплава BT6 после стандартной термообработки имеют прочность до 1100 МПа и относительное удлинение 12 – 15 %. В комплексе принципиально важных эксплуатационных свойств лопаток компрессора является сопротивление усталостным и эрозионным воздействиям. В соответствии с требованиями технических условий (ТУ) уровень усталостной прочности лопаток из сплава BT6 составляет около 410 МПа. Обеспечение требуемых усталостных свойств достигается путем дополнительного на финишном этапе обработки применения упрочняющих методов поверхностно-пластической деформации (ППД), как виброгалтование, вальцевание. Применение методов ППД позволяет повысить предел выносливости на 5 – 15% [7]. Однако данные методы не обеспечивают стабильность достигаемых результатов упрочнения, а в отдельных случаях исчерпали себя, когда радиусы кромок лопаток соизмеримы с глубиной упрочнения [2].

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств промышленных сплавов является создание в них нанокристаллических или ультрамелкозернистых (УМЗ) структур методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [8]. Металлические материалы с размером структурных элементов от 1 мкм до 100 нм и менее представляют собой большой интерес благодаря их уникальным физико-механическим свойствам: высокой прочности, усталостной прочности, износостойкости, низкотемпературной и/или высокоскоростной сверхпластичности [8,9]. Большое количество публикаций демонстрируют повышение прочностных, усталостных, трибологических характеристик ультрамелкозернистого сплава BT6, получаемого методами ИПД: всесторонней ковкой [10 - 12], равноканальным угловым прессованием (РКУП) [9, 13, 14], а также их комбинацией с традиционными методами прокатки, экструзии и др. [14, 15].

Таким образом, в настоящее время для изготовления лопатки с высокой усталостной прочностью, многие исследователи рекомендуют получать мелкозернистую и равномерную микроструктуру в промежуточных заготовках используя минимальное количество нагревов в двухфазной области [8,16].

Рассмотрим в деталях технологию изготовления тонкой турбинной лопатки длиной 1016 мм из сплава с содержанием титана (6%), алюминия (4%), ванадия

(Ti-6Al-4V) с улучшенными характеристиками по усталости и высокой размерной точностью [18]. Аналогом данного сплава является титановый сплав BT6 (Ti-6,5Al-5,1V) стран СНГ.

Для получения прутковых заготовок с мелкозернистой структурой и изготовление тонкой турбинной лопатки, авторы работы [17] разработали технологический процесс, состоящих из следующих технологических схем: протяжка исходной заготовки на гидравлическом прессе и четырехбойком ковочной машине GFM, расплющивания прутковой заготовки на бесшаботном молоте, скручивания на гидравлическом прессе и окончательная штамповка. Необходимо отметить, что для окончательной штамповки точных по размерам лопатки длиной 1016 мм из материала Ti-6Al-4V авторы работы [2] использовали бесшаботный молот. Подробно анализируем существующую технологию обработки турбинной лопатки.

При изготовлении турбинных лопаток в следующей последовательности используют технологические операции [17]. Исходный брикет получают методом спекания титановой губки и легирующих элементов в среде аргона с уплотнением на гидравлическом прессе. Затем производился двойной переплав этой заготовки в вакуумной дуговой печи с получением слитка диаметром 840 мм.

Для проработки литой структуры, слиток нагревают до температуры выше температуры полиморфного превращения (T_m) и затем протягивают в плоских бойках с диаметра 840 мм на диаметр 470 мм. Для протяжки используют гидравлический пресс усилием 30 МН [17]. Затем, чтобы получить мелкозернистую микроструктуру, заготовку нагревают до температуры ниже T_m и на прессе с тем же усилием протягивают в плоских бойках с диаметра 470 мм на диаметр 400 мм, после чего производят термообработку. Далее, чтоб получить тонкую и равномерную двухфазную микроструктуру, производят пластическую деформацию при незначительном количестве нагревов. Для решения этой задачи заготовку нагревают до температуры ниже T_m и производят ковку с диаметра 400 мм на диаметр 135 мм на четырехбойковой ковочной машине фирмы GFM. Далее производят штамповку турбинных лопаток.

На рис. 1 представлена последовательность технологических операций предварительной штамповки лопатки [17]. По данной технологии, после отрезки прутковой заготовки и ее обточки на соответствующую длину и диаметр, производят ультразвуковой контроль на отсутствие дефектов. После этого прутковая заготовка отковывается на ступенчатый профиль на четырехбойковой управляемой от ЧПУ ковочной машине фирмы GFM. Затем, для набора материала под замковую часть лопатки, часть ступенчатой заготовки подвергают высадке на гидравлическом прессе усилием 10 МН. Вышеприведенная технология позволяет получить промежуточную заготовку, т.е. полуфабрикат с заданным

изменением диаметральных размеров по длине и распределением металла по объему заготовки, которые соответствуют профилю готовой детали.

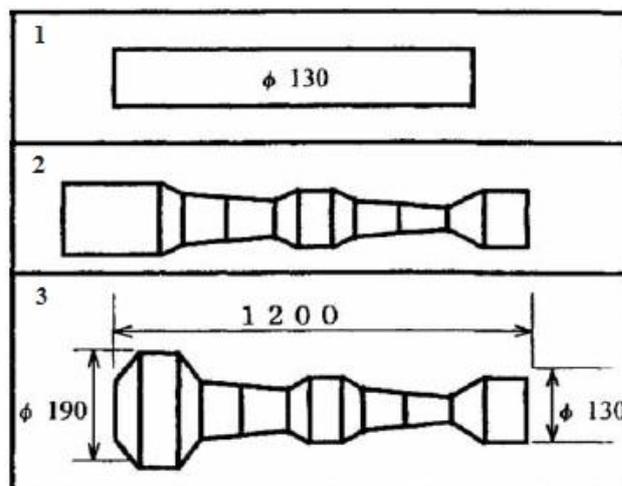


Рис. 1. Технологическая схема получения полуфабрикатов: 1 – обточенная прутковая заготовка; 2 – предварительно откованная на машине GFM заготовка; 3 – заготовка после высадки

По мнению авторов работы [17], при получении точных по размеру полуфабрикатов лопатки длиной 1016 мм на бесшаботном молоте имеются проблемы связанные с ограничением усилия при расплющивании и угла поворота при кручении заготовки. Для решения этой проблемы, авторы работы [17] рассмотрели метод деформирования, позволяющая эффективно использовать энергию молота для деформации материала. Специалисты фирмы GFM рассчитали усилия штамповки, которая необходимо для изготовления плоской заготовки при полном заполнении металлом ручья штампа. Для моделирования штамповки прутковой заготовки использовали метод конечных элементов. В результате моделирования авторы работы [17] разработали технологию штамповки, состоящей из следующих трех ступеней:

1. На бесшаботном молоте расплющивания прутковой заготовки. В результате расплющивания без скручивания получают промежуточную заготовку полосовидной формы;

2. Скручивание промежуточной заготовки. На этой ступени используя гидравлический пресс усилием 10 МН производят скручивание заготовки полосовидной формы на соответствующие углы кручения;

3. В третьей ступени производят окончательную штамповку промежуточной заготовки. На этой ступени использование бесшаботного молота позволяет достичь высокой точности размеров лопатки.

На рис. 2 показан этот трехступенчатый процесс штамповки, состоящий из расплющивания заготовки на бесшаботном молоте и скручивания полученной заготовки на гидравлическом прессе и окончательной штамповки на молоте.

Из материалов работы [17] видно, что в результате использования разработанной технологии

штамповки турбинных лопаток были изготовлены точные детали без дефектов, связанные с неполным заполнением полости штампа.

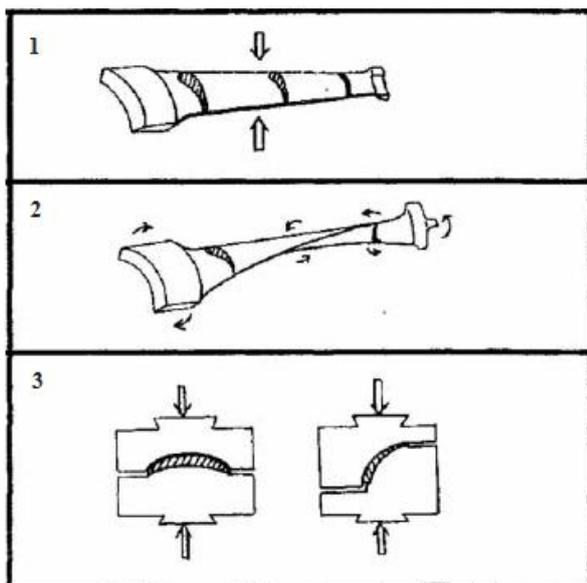


Рис. 2. Трехступенчатый процесс штамповки лопатки: 1 – расплющивание; 2 – скручивание; 3 – окончательная штамповка

В работе [17] отштампованные лопатки термообработали по стандартному режиму и произвели контроль их механических свойств. Авторы работы установили, что структура металла и механические свойства полученной лопатки соответствуют всем требованиям международного стандарта, при этом испытание на усталость показала, что усталостная прочность равняется 460 МПа при 107 циклах нагрузки.

Таким образом, в работе [17] достигнуты следующие результаты:

1. Разработана новая технология штамповки турбинных лопаток, которая состоит изковки слитков в плоских бойках, протяжки промежуточной заготовки на четырехбойковой ковочной машине фирмы GFM, расплющивания прутковой заготовки на бесшаботном молоте и скручивания полученной полосовидной заготовки на гидравлическом прессе и окончательной штамповки на бесшаботном молоте.

2. Из сплава Ti-6Al-4V получены высококачественные тонкие лопатки длиной 1016 мм.

2. Выявлено, что при расплющивании более эффективно используется энергия оборудования, ручьи штампа заполняются металлом лучше, чем при штамповке лопатки в окончательном ручье штампа.

3. Протяжкой прутковых заготовок на четырехбойковой ковочной машине фирмы GFM и предварительным фасонированием прутков на данной машине получены лопатки с мелкозернистой и однородной двухфазной микроструктурой.

4. Получены готовые лопатки, у которых механические свойства, усталостная прочность соответствуют международным стандартам.

Однако, по нашему мнению в анализируемой технологии имеются недостатки. Проведем анализ недостатков существующей, в том числе разработанной технологийковки и штамповки поковок из титановых сплавов.

Результаты анализа различных технологий [18,19] подготовки заготовок для штамповки поковок из титановых сплавов показывают, что на трудоемкость и производительность, а также на качество получаемых поковок сильное влияние оказывают физические свойства титановых сплавов и специфика их построения.

Наиболее важным фактором, влияющим на разработку технологии и выбор режимовковки и штамповки титановых сплавов, является низкая теплопроводность титана и его сплавов [18,19]. Теплопроводность титановых сплавов примерно в 15 раз ниже теплопроводности алюминия и в 5 раз меньше теплопроводности стали. Пониженные значения теплопроводности приводят к значительным температурным перепадам по сечению слитков и заготовок при нагреве и возникновению значительных напряжений, а в отдельных случаях – к образованию трещин.

Еще одним фактором, влияющим на качество титановых поковок является активное взаимодействие титана и его сплавов с кислородом, азотом, водородом и кислородсодержащими газами атмосферы при температурах нагрева для горячей деформации [18,19]. При нагреве на воздухе на поверхности заготовок образуется окалина, начинающая отслаиваться при температурах выше 900°C. Однако, наряду с образованием окалины, происходит диффузия кислорода, водорода и азота с образованием поверхностных газонасыщенных слоев. Эти слои характеризуются высокой твердостью и низкой пластичностью.

Необходимо особо отметить, что нагрев до температур, соответствующих β -области, и дальнейшее повышение температуры сопровождается значительным повышением пластичности литого и деформированного металла, а также снижением сопротивления деформации [18,19]. Однако в большинстве случаев деформация в β -области не дает возможности получить мелкозернистую рекристаллизованную структуру. Оптимальная структура может быть получена при деформации в β -области с переходом в $(\alpha + \beta)$ -область. Однако пластичность металла при деформации в $(\alpha + \beta)$ -области намного ниже, а сопротивление деформации – значительно выше.

Следующим фактором, влияющим на разработку технологии и выбор режимовковки и штамповки титановых сплавов, является высокий коэффициент трения на поверхности контакта с инструментом. Это связано с повышенной способностью титана и его сплавов раскислять окисные пленки на поверхности инструмента. Раскисление окисных пленок способствует к «схватыванию» титана и их сплавов с материалом инструмента, т.е. к образованию на контактной поверхности мостиков сварки [18,19]. Это приводит к увеличению неравномерности

деформации, уменьшению стойкости инструмента, ухудшению качества поверхности поковок и увеличению требуемого усилия деформирования.

Описанные выше особенности титановых сплавов приводят к необходимости минимизации времениковки, штамповки и создания условий для управляемой локализации деформации в поверхностном слое заготовки на первоначальном этапе деформирования и в центральной зоне в последующем этапековки [18,19]. При этом грани заготовок необходимо периодически притуплять для ликвидации чрезмерного захлаживания углов поковки.

Необходимо отметить, что в разработанной технологии для уменьшения поперечного сечения и увеличения длины слитков и промежуточных заготовок при ковке по схеме «квадрат-квадрат», «круг-квадрат-круг» или «круг-круг» широко используют протяжку в плоских бойках. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) металла при ковке в плоских бойках показывает, что деформация локализуется по ковочному кресту, а максимальная деформация сосредоточивается в центральной зоне заготовки [18,19]. При этом в прилегающих к инструменту зонах поковки возникают значительные контурные растягивающие напряжения и деформации, которые при ковке поковок из титановых сплавов могут привести к нарушению сплошности металла. Известно, что неравномерное распределение НДС приводит к структурной неоднородности кованных прутков.

Вышеотмеченная неравномерность НДС при ковке в плоских бойках также связана с неравномерной кантовкой и подачей заготовки, неодинаковыми степенями деформации сдвига за каждый ход (на прессе) или удар (на молоте), захлаживанием поверхности металла, наличием зон затрудненной деформации и т.д.

Как показала практика производства штампованных поковок дисков и лопаток из титановых сплавов, сам процесс штамповки оказывает огромное влияние на формирование структуры и структурной неоднородности в силу неравномерности распределения деформации в поковках из-за разной формы и соотношения размеров фигуры окончательного или заготовительного штампа и заготовки [18,19]. Кроме того, как отмечалось ранее, большую роль в увеличении неоднородности структуры играют неравномерное температурное поле в объеме поковки, скоростные режимы деформации и режимы охлаждения поковок.

На основе анализа литературных данных, для получения качественных поковок нами предлагается использовать следующую технологию изготовления турбинных лопаток:

1. Нагрев слитка до температуры выше $T_{\text{пн}}$ и протяжка в комбинированных бойках (верхний – плоский, нижний – вырезной) гидравлического пресса усилием 30 МН с диаметра 840 мм на диаметр 570мм.

2. Нагрев заготовки до температуры ниже $T_{\text{пн}}$ и протяжка в комбинированных бойках с диаметра 570мм на диаметр 470 мм;

3. Нагрев заготовки до температуры выше $T_{\text{пн}}$ и протяжка с диаметра 470 мм до диаметра 400 мм на четырехбойковом ковочном машине фирмы GFM.

4. Нагрев промежуточной заготовки до температуры ниже $T_{\text{пн}}$ и протяжка с диаметра 400 мм до диаметра 135 мм на четырехбойковом ковочном машине фирмы GFM.

5. Отрезка из прутковой заготовки мерной заготовки, обточка данной заготовки на соответствующую длину и диаметр, ультразвуковой контроль на отсутствие дефектов.

6. Ковка мерной заготовки на ступенчатый профиль на четырехбойковой управляемой от ЧПУ ковочной машине фирмы GFM.

7. Высадка части ступенчатой заготовки в инструменте с изменяющей формой гидравлического прессы усилием 10 МН.

8. Расплющивания прутковой заготовки на бесшаботном молоте.

9. Скручивание промежуточной заготовки на гидравлическом прессы усилием 10 МН;

10. Окончательная штамповка промежуточной заготовки на бесшаботном молоте и получение турбинных лопаток с точными размерами.

Равномерное распределение НДС при протяжке слитка и заготовок в комбинированных бойках и на четырехбойковом ковочном машине фирмы GFM позволяет получить прутковые заготовки с мелкозернистой структурой. Равномерная и мелкозернистая структура промежуточной заготовки повышает качество окончательного изделия, т.е. турбинных лопаток.

При проведенииковки рекомендуется комбинированные бойки нагревать до температуры не ниже 250–300°C во избежание захлаживания поверхности деформируемого металла. Острые, быстро захлаживаемые грани заготовок рекомендуется периодически притуплять. Процессковки рекомендуется вести частыми обжатиями для сохранения заданной температуры.

Вывод

1. При изготовлении турбинных лопаток широко применяются технологии протяжки промежуточных заготовок в плоских бойках.

2. При протяжке в плоских бойках напряженно-деформированного состояния в заготовке распределяется неравномерно, при этом деформация локализуется по ковочному кресту, а максимальная деформация сосредоточивается в центральной зоне заготовки.

3. Для изготовления качественных турбинных лопаток из титановых сплавов рекомендуется использовать совмещенный процесс обработки металлов давлением, как протяжка в комбинированных бойках и на радиально-ковочной машине и высадка в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности.

Список литературы

1. *Лозицкий Л.П.* Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. - М.: Воздушный транспорт, 1992. - 535 с.
2. *Павлинич С.П.* К вопросу о применении наноструктурных материалов для лопаток компрессора стационарных ГТД, работающих в условиях больших ресурсов // *Машины и аппараты*, 2006, том 4, №1. С. 197 – 200.
3. *Осадчий В.Я., Лянашин В.Б., Князев Я.О.* Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины // *Заготовительное производство – 2013 – №3* с. 22-25.
4. *Полетаев В.А.* Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинного двигателя. - М.: Машиностроение, 2006. 130 с.
5. *Терентьев В.В., Ионов А.В., Болховитин М.С.* Проблемы выбора технологии производства лопаток компрессоров ГТД. М.: «Русский инженер», 2012, № 5. С. 298 – 292.
6. *Чумаченко Е.Н., Смирнов В.М., Цепин М.А.* Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. - М.: Ком.Книга, 2005. - 320 с.
7. *Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин, Изд. «Машиностроение», 1988, 240 с.
8. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
9. [9] «Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных материалов с уникальными механическими свойствами» / Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, Д.В. Гундеров и др. // *Нанотехника*, № 2, 2006, с. 32 – 43.
10. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией / С.В. Жеребцов, Р.М. Галеев, О.Р. Валиахметов и др. // *Кузнечно-штамповочное производство*, № 7, (1999) 17 – 22.
11. *Салищев Г.А., Галеев Р.М.* Формирование субмикроструктурной структуры в титане и его сплавах // *Сборник научных трудов конференции «Физикохимия ультрадисперсных систем» Екатеринбург*, (2001) 189 – 194.
12. Формирование мезоструктуры и механическое поведение титана в ходе большой пластической деформации / Г.А. Салищев, С.В. Жеребцов, С.Ю. Миронов и др. // *Вопросы Материаловедения*. - 2003. - Т.1, №33. - С.175-184.
13. [Саитова Л.Р., Семенова И.П., Рааб Г.И. Повышение механических свойств сплава Ti-6Al-4V, используя равноканальное угловое прессование и последующую пластическую деформацию / *Физика и техника высоких давлений*, Донецк, 2004, том 14, № 4. С. 19 – 24.
14. Влияние ионного модифицирования на механические свойства титанового сплава ВТ6 в субмикроструктурном состоянии / Галеев Р.М., Салищев Г.А., Смыслов А.М. и др. // *В межвузовском тематическом сборнике: Оптимизация материалов.*-Уфа: УГАТУ, 1998, с. 156-160.
15. Разработка Ti-6Al-4V листа с низкотемпературными сверхпластичными свойствами / Г.А. Салищевым, Р.М. Галеев, О.Р. Валиахметов и др. // *Технология обработки материалов*, 116 (2001) 265 - 268.
16. *Чепкин В.М.* Опыт и проблемы применения титановых сплавов в авиационных двигателях // *Титан*. 1995. № 1-2 (5-6). 13-15 с.
17. *Aviapanorama.su/wp-content/uploads/2009/05/20.pdf*.
18. *Машеков С.А., Биякаева Н.Т., Машекова А.С.* Монография. Проблемыковки титановых сплавов и их решения. Часть 1 и 2 Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 230 с. и 251 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Кожобаев К.А.