

ISSN 1991-3494

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Ш Ы С Ы

---

---

## ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА  
PUBLISHED SINCE 1944

3

---

АЛМАТЫ  
АЛМАТЫ  
ALMATY

2015

МАМЫР  
МАЙ  
MAY

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі

**М. Ж. Жұрынов**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы :

биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Айтхожина Н.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байпақов К.М.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байтулин И.О.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Берсімбаев Р.И.**; хим. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Газалиев А.М.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Дүйсенбеков З.Д.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Елешев Р.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; фил. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Нысанбаев А.Н.**; экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА академигі **Сатубалдин С.С.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбжанов Х.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішева З.С.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Абсадықов Б.Н.** (бас редактордың орынбасары); а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Баймұқанов Д.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Байтанаев Б.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Давлетов А.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; геогр. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Медеу А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мырхалықов Ж.У.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Огарь Н.П.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Таткеева Г.Г.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Үмбетаев И.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і :

Ресей ҒА академигі **Велихов Е.П.** (Ресей); Әзірбайжан ҰҒА академигі **Гашимзаде Ф.** (Әзірбайжан); Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Джрбашян Р.Т.** (Армения); Ресей ҒА академигі **Лаверов Н.П.** (Ресей); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Москаленко С.** (Молдова); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Рудик В.** (Молдова); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Сагян А.С.** (Армения); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Тодераш И.** (Молдова); Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Якубова М.М.** (Тәжікстан); Молдова Республикасының ҰҒА корр. мүшесі **Лупашку Ф.** (Молдова); техн. ғ. докторы, профессор **Абиев Р.Ш.** (Ресей); техн. ғ. докторы, профессор **Аврамов К.В.** (Украина); мед. ғ. докторы, профессор **Юрген Аппель** (Германия); мед. ғ. докторы, профессор **Иозеф Банас** (Польша); техн. ғ. докторы, профессор **Гарабаджиу** (Ресей); доктор PhD, профессор **Ивахненко О.П.** (Ұлыбритания); хим. ғ. докторы, профессор **Изабелла Новак** (Польша); хим. ғ. докторы, профессор **Полещук О.Х.** (Ресей); хим. ғ. докторы, профессор **Поняев А.И.** (Ресей); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); техн. ғ. докторы, профессор **Хрипунов Г.С.** (Украина)

Главный редактор

академик НАН РК

**М. Ж. Журинов**

Редакционная коллегия:

доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Н.А. Айтхожина**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **К.М. Байпаков**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **И.О. Байгулин**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Р.И. Берсимбаев**; доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **А.М. Газалиев**; доктор с.-х. наук, проф., академик НАН РК **З.Д. Дюсенбеков**; доктор сельскохоз. наук, проф., академик НАН РК **Р.Е. Елешев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор фил. наук, проф., академик НАН РК **А.Н. Нысанбаев**; доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **С.С. Сатубалдин**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Х.М. Абжанов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **З.С. Абишева**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Н. Абсадыков** (заместитель главного редактора); доктор с.-х. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Д.А. Баймуканов**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.А. Байтанаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А.Е. Давлетов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор геогр. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А. Медеу**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.У. Мырхалыков**; доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.П. Огарь**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Г.Г. Таткеева**; доктор сельскохоз. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И. Умбетаев**

Редакционный совет:

академик РАН **Е.П. Велихов** (Россия); академик НАН Азербайджанской Республики **Ф. Гашимзаде** (Азербайджан); академик НАН Украины **В.В. Гончарук** (Украина); академик НАН Республики Армения **Р.Т. Джрбашян** (Армения); академик РАН **Н.П. Лаверов** (Россия); академик НАН Республики Молдова **С. Москаленко** (Молдова); академик НАН Республики Молдова **В. Рудик** (Молдова); академик НАН Республики Армения **А.С. Сагиян** (Армения); академик НАН Республики Молдова **И. Тодераш** (Молдова); академик НАН Республики Таджикистан **М.М. Якубова** (Таджикистан); член-корреспондент НАН Республики Молдова **Ф. Лупашку** (Молдова); д.т.н., профессор **Р.Ш. Абиев** (Россия); д.т.н., профессор **К.В. Аврамов** (Украина); д.м.н., профессор **Юрген Аппель** (Германия); д.м.н., профессор **Иозеф Банас** (Польша); д.т.н., профессор **А.В. Гарабаджиу** (Россия); доктор PhD, профессор **О.П. Ивахненко** (Великобритания); д.х.н., профессор **Изабелла Новак** (Польша); д.х.н., профессор **О.Х. Полещук** (Россия); д.х.н., профессор **А.И. Поняев** (Россия); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); д.т.н., профессор **Г.С. Хрипунов** (Украина)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан». ISSN 1991-3494

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

Editor in chief

**M. Zh. Zhurinov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**N.A. Aitkhozhina**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **K.M. Baipakov**, dr. hist. sc., prof., academician of NAS RK; **I.O. Baitulin**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **R.I. Bersimbayev**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **A.M. Gazaliyev**, dr. chem. sc., prof., academician of NAS RK; **Z.D. Dyusenbekov**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **R.Ye. Yeleshev**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **T.Sh. Kalmenov**, dr. phys. math. sc., prof., academician of NAS RK; **A.N. Nysanbayev**, dr. phil. sc., prof., academician of NAS RK; **S.S. Satubaldin**, dr. econ. sc., prof., academician of NAS RK; **Kh.M. Abzhanov**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Z.S. Abisheva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.N. Absadykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **D.A. Baimukanov**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.A. Baytanayev**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A.Ye. Davletov**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A. Medeu**, dr. geogr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.U. Myrkhalykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **N.P. Ogar**, dr. biol. sc., prof., corr. member of NAS RK; **G.G. Tatkeeva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **I. Umbetayev**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**E.P. Velikhov**, RAS academician (Russia); **F. Gashimzade**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **V.V. Goncharuk**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **R.T. Dzhrbashian**, NAS Armenia academician (Armenia); **N.P. Laverov**, RAS academician (Russia); **S.Moskalenko**, NAS Moldova academician (Moldova); **V. Rudic**, NAS Moldova academician (Moldova); **A.S. Sagiyan**, NAS Armenia academician (Armenia); **I. Toderas**, NAS Moldova academician (Moldova); **M. Yakubova**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **F. Lupaşcu**, NAS Moldova corr. member (Moldova); **R.Sh. Abiyev**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **K.V. Avramov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine); **Jürgen Appel**, dr.med.sc., prof. (Germany); **Joseph Banas**, dr.med.sc., prof. (Poland); **A.V. Garabadzhiu**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **O.P. Ivakhnenko**, PhD, prof. (UK); **Isabella Nowak**, dr.chem.sc., prof. (Poland); **O.Kh. Poleshchuk**, chem.sc., prof. (Russia); **A.I. Ponyaev**, dr.chem.sc., prof. (Russia); **Mohd Hassan Selamat**, prof. (Malaysia); **G.S. Khripunov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine)

**Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.**  
ISSN 1991-3494

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,  
<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 1991-3494

Volume 3, Number 355 (2015), 112 – 120

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

**S. A. Mashekov, K. K. Nurakhmetova**

Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: mashekov.1957@mail.ru, nurakhmetova52@mail.ru

**Keywords:** titanium alloys, stamping, forging, strikers tool.

**Abstract.** 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 recommended for the manufacture of high-quality turbine blades made of titanium alloys 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. The article also considers technology forming the turbine blades, which consists of forging ingots in the flat die, drawing blanks on the intermediate four-die forging machine company GFM, flattening bar stock on counterblow hammer and twisting

the resulting strip blanks in a hydraulic press and final stamping on counterblow hammer. Also found that the flattening of more energy efficient equipment, streams are filled with metal die better than punching blades in the final stamp creek. An analysis of the various technologies of preparation of blanks for stamping forgings made of titanium alloys show that labor and productivity, as well as the quality of the forgings is heavily influenced by the physical properties of titanium alloys and specificity of their construction. Results of the study of stress-strain state of the metal forging in flat die shows that the deformation is localized by forging cross, and the maximum deformation is concentrated in the central area of the workpiece. Also discussed in detail the stages of production of turbine blades.

УДК 669.35.074.669.539.5

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА РУБЕЖОМ

С. А. Машеков, К. К. Нурахметова

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

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

**Аннотация.** В статье рассматривается 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.

В работе также рассмотрена технология штамповки турбинных лопаток, которая состоит изковки слитков в плоских бойках, протяжки промежуточной заготовки на четырехбойковой ковочной машине фирмы GFM, расплющивание прутковой заготовки на бесшаботном молоте и скручивание полученной полосовидной заготовки на гидравлическом прессе и окончательной штамповки на бесшаботном молоте. Также выявлено, что при расплющивании более эффективно используется энергия оборудования, ручьи штампа заполняются металлом лучше, чем при штамповке лопатки в окончательном ручье штампа. В результате анализа различных технологий 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. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла при ковке в плоских бойках показывает, что деформация локализуется по ковочному кресту, а максимальная деформация сосредоточивается в центральной зоне заготовки. Также детально рассмотрены этапы производства турбинных лопаток.

Турбинные и компрессорные лопатки является одной из наиболее важных деталей в машиностроении [1-3]. 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 поверхностную 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 ВТ6 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 ВТ6, 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 ВТ6 (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, состоящий из следующих технологических схем: протяжка исходной заготовки на гидравлическом прессе и четырехбойком ковочном 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 ( $T_{\text{пн}}$ ) 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  $T_{\text{пн}}$  и на прессе с тем же усилием протягивают в плоских бойках с диаметра 470 мм на диаметр 400 мм, после чего производят термообработку. Далее, чтобы получить тонкую и равномерную двухфазную микроструктуру, производят пластическую деформацию при незначительном количестве нагревов. Для решения этой задачи заготовку нагревают до температуры ниже  $T_{\text{пн}}$  и производят ковку с диаметра 400 мм на диаметр 135 мм на четырехбойковом ковочном машине фирмы GFM. Далее производят штамповку турбинных лопаток.

На рисунке 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

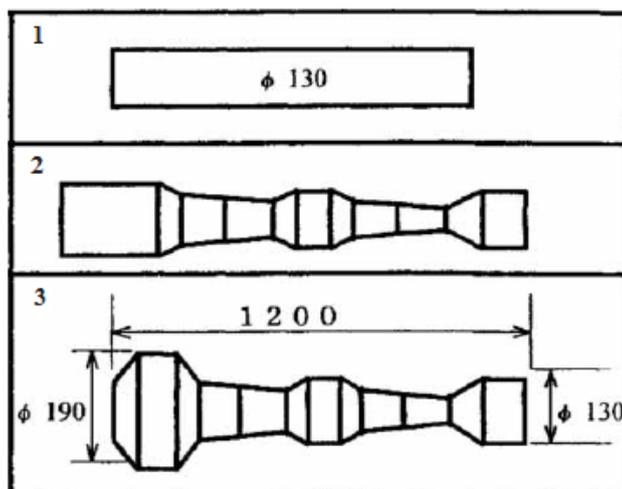


Рисунок 1 – Технологическая схема получения полуфабрикатов: 1 – обточенная прутковая заготовка; 2 – предварительно откованная на машине GFM заготовка; 3 – заготовка после высадки

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.

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 расплющивания и угла поворота при кручение 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 заполнение металлом ручья штампа. Для моделирования штамповки прутковой заготовки использовали метод конечных элементов. В результате моделирования авторы работы [17] разработали технологию штамповки, состоящей из следующее трех ступеней:

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

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

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

На рисунке 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.

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.

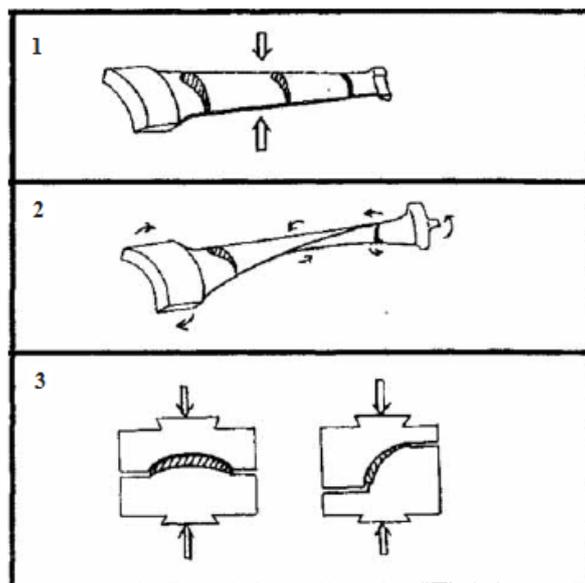


Рисунок 2 – Трехступенчатый процесс штамповки лопатки:  
1 – расплющивание; 2 – скручивание; 3 – окончательная штамповка

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

1. Разработана новая технология штамповки турбинных лопаток, который состоит изковки слитков в плоских бойках, протяжки промежуточной заготовки на четырехбойковом ковочном 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.

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

4. Протяжкой прутковых заготовок на четырехбойковой ковочной машине фирмы GFM и предварительным фасонированием прутков на данном машине получено лопатки с мелкозернистой и однородной двухфазной микроструктурой.

5. 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  $\beta$ -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  $\beta$ -области не дает возможности получить мелкозернистую рекристаллизованную структуру. Оптимальная структура может быть получена при деформации в  $\beta$ -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 центральном слое в последующем этапековки [18, 19]. При этом грани заготовок необходимо периодически при-туплять для ликвидации чрезмерного захолаживания углов поковок.

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), захолаживанием 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  $T_{\text{III}}$  и протяжка в комбинированных бойках (верхний – плоский, нижний – вырезной) гидравлического пресса усилием 30 МН с диаметра 840 мм на диаметр 570 мм.

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

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

4. Нагрев промежуточной заготовки до температуры ниже  $T_{\text{пл}}$  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 прессе усилием 10 МН.

8. Расплющивания прутковой заготовки на бесшаботном молоте.

9. Скручивание промежуточной заготовки на гидравлическом прессе 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 мелкзернистая структура промежуточной заготовки повышает качество окончательного изделия, т.е. турбинных лопаток.

При проведениековки 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 технология 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-ковочном машине и высадка в инструменте с изменяющейся формой рабочей поверхности.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

[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.,* Лянин 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] «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] Сaitова 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 VT6 в субмикроструктурированном 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.

[18,19] 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.

## REFERENCES

[1] Lozitskiy L.P. Konstruktsiya i prochnost' aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley. *Vozdushnyy transport*, **1992**, p.535 (in Russ.).

[2] Pavlinich S.P. On the question of the application of nanostructured materials for compressor blades stationary turbine engine, operating under bolshih resursov. *Machines and devices*, **2006**, Volume 4, №1, 197-200.

[3] Osadchiy V.I., Lenyashin V.B., Knyazev Ya.O. Innovative stamping compressor blades shorter length. *Blank production*, **2013**, №3, 22-25.

[4] Poletaev V.A. The technology of automated production of gas turbine engine blades. *Engineering*, **2006**. 130 p.

[5] Terentyev V.V., Ionov A.V., Bolkhovitin M.S. Problems of selection of production technology compressor blades of GTE. *"Russian inzhpener"*, **2012**, № 5. 298-292.

[6] Chumachenko E.H., Smirnov V.M., Tsepin M.A. Sverplastichnost: materials, theory of technology. *Kom.Kniga*, **2005**, 320 p.

[7] Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Y.D. The surface layer and performance of the machine parts, *Ed. "Engineering"*, **1988**, 240 p.

[8] Valiyev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey. *Logos*, **2000**, p. 271 (in Russ.).

[9] Valiev R.Z., Raab G.I., Gunder D.V. etc. "Development of methods of severe plastic deformation to produce bulk nanostructured materials with unique mechanical properties". *Nanotechnics*, № 2, **2006**, 32-43.

[10] Stallions S.V., Galeev R.M., Valiakhmetov O.R. Formation submicrocrystalline structure in titanium alloys by severe plastic deformation. *Forging and stamping production*, № 7, **1999**, 17-22.

[11] Salishchev G.A., Galeev R.M. Formation submicrocrystalline structure in titanium and its alloys. *Collection of scientific works of the conference "Physical chemistry of ultrafine systems" Yekaterinburg*, **2001**, 189-194.

[12] Salishchev G.A., Stallions S.V., Mironov S.Y. The formation of the mesostructure and the mechanical behavior of titanium in the large plastic deformation. *Problems of Materials Science*, **2003**, T.1, №33, 175-184.

[13] Semenova I.P., Raab G.I., Saitova L.R., Valiev R.Z.. The effect of equal channel angular pressing on the structure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V alloy. *Mater. Sci. Eng.*, **2004**, 805-808.

[14] Galeev R.M., Salishchev G.A., Smyslov A.M. The effect of ion modification of the mechanical properties of titanium alloy VT6 at submicrocrystalline state. *Optimization materialov, Ufa USATU*, **1998**, 156-160.

[15] G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, R.V. Safiulin, R.Y. Lutfullin, O.N. Senkov, F.H. Froes, O.A. Kaibyshev, Development of Ti- 6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties. *Journal of Materials Processing Technology* 116, **2001**, 265-268.

[16] Chepkin V.M. Opyt i problemy primeneniya titanovykh splavov v aviatsionnykh dvigatelyakh. *Titan*, **1995**, № 1-2 (5-6), 13-15 (in Russ.).

[17] Aviapanorama.su/wp-content/uploads/2009/05/20.pdf (in Russ.).

[18,19] Mashekov S.A., Biyakayeva N.T., Masheкова A.S. Monografiya. Problemy kovki titanovykh splavov i ikh resheniya. Chast' 1 i 2. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, **2013**, p.230 and p.251 (in Russ.).

## ТИТАН ҚОРЫТПАЛАРЫНАН ЖАСАЛҒАН ТУРБИНАЛЫҚ ЖҮЗДЕРДІ ШТАМПАУ МӘСЕЛЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ШЕШУ ЖОЛДАРЫ

С. А. Машеков, К. К. Нұрахметова

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университет, Алматы, Қазақстан

**Тірек сөздер:** титанды құймалар, штампау, соғу, істік, құрал.

**Аннотация.** Титан қорытпаларын соғу және штампаудың инновациялық технологияларын әзірлеу және іске асыру жартылай дайын өнім ассортиментін кеңейтуге, сапаны арттыруға, энергия тұтынуды төмендетуге мүмкіндік береді, ал бұл әрине, өнеркәсіпті жаңғыртудың маңызды міндеті болып табылады.

Мақалада, титан қорытпаларынан жасалған жоғары сапалы турбиналық қалақтарды өндіру үшін аралас істіктерде және радиалды-соғу машинасында созу арқылы металлды қысыммен өңдеудің аралас процесін пайдалану ұсынылады. Сонымен қатар, жоғары сапалы темірлерді алу үшін қондыру кезінде жұмыс бетінің пішіні өзгертін құралды пайдалану ұсынылған. Турбиналық қалақтарды қалыптастырудың әртүрлі технологиясы да қарастырылады. Жабдықтардың энергиясы тегістеу кезінде аса тиімді пайдаланылатыны және штамптың ағындары металлмен жақсырақ толтырылатыны анықталды. . Титан қорытпаларынан жасалған темірлерді штамптаудың әртүрлі технологияларын талқылау нәтижесінде еңбек өнімділігі және алынған темірлердің сапасына титан қорытпаларының физикалық қасиеттері және олардың құрылыс ерекшелігі қатты әсер ететіні көрсетілді. Сонымен қатар, жазық бетте металл соғу процессінің кернеулі-деформацияланған күйін зерттеу нәтижелері ең максималды деформация қалыптың орталық аймағында шоғырланатынын көрсетеді. Сондай-ақ мақалада, егжей-тегжейлі турбиналық қалақтарды өндіру кезеңдері талқыланады.

*Поступила 22.05.2015 г.*

---

---

**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

[bulletin-science.kz](http://bulletin-science.kz)

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов, Т. А. Апендиев*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 28.05.2015.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

17,7 п.л. Тираж 2000. Заказ 3.