

В диссертационный совет Д 212.125.16 на базе  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу  
Головкина Сергея Алексеевича «Повышение размерной точности штамповок  
лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости  
штампового инструмента за счет совершенствования технологического  
процесса штамповки», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.16.05 – Обработка  
металлов давлением

### Актуальность темы.

Наиболее массовыми деталями в современных газотурбинных двигателях (ГТД) являются лопатки компрессора. Лопатки компрессора ГТД обладают рядом специфических особенностей - перо таких лопаток относительно тонкое с малой кривизной и со значительным перепадом по толщине от концевого к корневому сечению. Точность изготовления пера лопаток регламентируется отраслевым стандартом ОСТ 1.02571-86. Особенности геометрии лопаток компрессора и требования к точности их изготовления накладывают жесткие требования к технологии изготовления.

Не смотря на то, что в последние годы все чаще звучат предложения использовать для изготовления лопаток компрессоров ГТД металлические композиционные материалы, основным материалом для них остаются титановые сплавы (ВТ22, ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ33). А из приведенного ряда - ВТ6 (сплав относят к числу первых отечественных конструкционных свариваемых титановых сплавов и является отечественным аналогом сплава Ti-6Al-4V). Обработка давлением титановых сплавов всегда сопряжена с проблемой низкой стойкости штамповой оснастки.

Лопатки компрессоров ГТД работают в условиях высоких температур, достигающих 600°C. Многократное изменение тепловых режимов работы двигателя - нагрев в момент запуска и быстрое охлаждение при остановке двигателя - вызывает циклическое изменение термических напряжений. Перо и хвостовик лопатки, помимо растяжения, изгиба и крутящего момента от скоростного газового потока, испытывают знакопеременные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах. Следовательно на лопатку компрессора ГТД в каждый

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

14 09 20 20

момент времени эксплуатации действует сложное сочетание разрушающих процессов механических и термических.

Поэтому совершенствование технологического процесса изготовления заготовок лопаток компрессора ГТД из сплава ВТ6 с целью обеспечения заданной точности, с высоким сопротивлением всем действующим на лопатку в процессе эксплуатации нагрузкам, с сохранением или улучшением экономических показателей производства является актуальной.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

05.16.05 – Обработка металлов давлением. Соответствует п. 1 – «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением»; п. 2 – «Исследование процессов пластической деформации металлов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»; п. 3 – «Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации»; п. 4 – «Оптимизация процессов и технологий обработки давлением для производства металлопродукции с заданными характеристиками качества. Математическое описание процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с целью создания математических моделей, способов, процессов и технологий».

**Степень достоверности результатов** обеспечена корректностью постановки задач, применением известных математических методов, обоснованным использованием допущений и ограничений при выводе теоретических зависимостей и подтверждается согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как лично автором, так и другими исследователями. Оценка параметров механического поведения материалов проведена в соответствии с требованиями стандартов. Анализ пластической деформации титанового сплава ВТ6 проводили с использованием конечно-элементного комплекса QForm 3D. Принятые в работе допущения и ограничения обоснованы и отражены в полном объеме.

Результаты практического применения разработок автора подтверждены актами внедрения в производство ПАО "ОДК-Сатурн" и в учебный процесс кафедры "Мехатронные системы и процессы формообразования" имени С.С. Силина РГАТУ.

**Научная новизна состоит в:**

- разработанном методе получения регламентированной ультра мелкозернистой структуры в двухфазном титановом сплаве путем интенсивной пластической деформации при изотермическом выдавливании

- по режимам, обеспечивающим протекание динамической рекристаллизации;
- установленной регрессионной зависимости, связывающая параметры процесса (коэффициент вытяжки, скорость деформирования и температура деформации) изотермического выдавливания и размер, получаемого в результате, зерна в титановом сплаве ВТ6 при динамической рекристаллизации;
  - установлении того, что при уменьшении размеров зерна в титановом сплаве ВТ6 в 2 раза напряжение течения при температуре  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  снижается на 42 %.

Достоверность проведенных исследований и полученных научных результатов подтверждена экспериментами.

**Практическая ценность** заключается в:

- разработанном способе получения заготовок с регламентированной структурой, под дальнейшую изотермическую штамповку, методом изотермического выдавливания (Способ выдавливания малопластичных материалов и устройство для его осуществления защищены патентом RU №2637451);
- разработанных технологических режимах изотермической штамповки, обеспечивающие уменьшение сопротивления деформации штампуемого материала, повышение стойкости штамповой оснастки при изотермической штамповке и повышение размерной точности штамповок лопаток ГТД (способ изготовления штамповок лопаток из титановых сплавов защищен патентом).

Результаты диссертации могут быть использованы в различных отраслях промышленности, таких как авиастроение, военно-промышленной отрасли нашей страны, а также могут быть внедрены учебный процесс технических ВУЗов.

**Замечания по диссертационной работе:**

1. В Главе 1 рассматриваемой работы отсутствует раздел, представляющий собой обзор современных материалов для изготовления лопаток компрессора ГТД, включающий перспективные металлические композиты, конструкционные керамики и т.д. Там же в обзоре методов получения ультрамелкозернистой структуры в разделе интенсивно развивающего метода равноканального углового прессования не упомянуты современные работы в этой области (например, Паршикова Р.А., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; Сосенушкина Е.Н., МГТУ "Станкин" и т.д.).

2. Глава 2 начинается с описания возможностей и приемов работы с программным комплексом Q Form 3D, более похожего на рекламу данного

широко применяемого специалистами программного продукта. Представляется, что эту часть работы можно было сократить.

3. На стр. 42 (Глава 2) коэффициент трения принят 0,2, в то время как при использовании стеклосмазки для изотермической штамповки титановых сплавов коэффициент контактного трения составляет 0,04-0,06. Принятое в расчетах значение коэффициента трения необоснованно.

4. Отсутствуют выводы по Главе 2.

5. Не указано в чем отличие уравнения (7) стр. 50, представляемого как авторское, от уравнения (15) стр.89, на которое есть ссылка [Ю.П. Адлер., Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, издание второе переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976]. Если уравнение (7) является репликой полнофакторного эксперимента, то следовало указать её параметры и причину применения именно такой реплики из всех возможных вариаций.

6. Оценку адекватности модели данным, по которым она была построена, следовало бы расширить за счет определения коэффициента Тейла и всех видов ошибок. А также рассчитать коэффициенты эластичности, которые бы наглядно показали уровень влияния каждого фактора на отклик.

7. На стр. 107 в описании предлагаемой технологии есть пункт - термообработка и ссылка на рис. 4.5, поясняющий данную технологию по переходам. Однако на этом рисунке нет данной операции. И не понятно ее назначение (не описано).

8. По оформлению. Большое количество общеизвестных фраз (например, ... при определенных условиях деформации и термической обработки преобразование структуры вызывает существенное изменение механических свойств металлических материалов, как технологических, так и эксплуатационных). Общая небрежность, например, в нумерации рисунков, формул и построении графического материала. Однако в целом замеченные опечатки не снижают общего положительного впечатления от представленной работы.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

### **Заключение.**

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения из области обработки металлов давлением, заключающиеся в повышении размерной точности штамповок лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и стойкости штампового инструмента за счет совершенствования технологического

процесса штамповки на основе известных математических методов, комплекса современных методов исследования пластической деформации и структуры и имеет существенное значение для развития российского авиастроения и машиностроения. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 5 научно-технических конференциях (2 с изданием трудов конференции), опубликованы в 5 печатных работах, в том числе 3 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, по результатам исследований данной диссертационной работы ее автором получено 3 патента РФ. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в области авиа- и машиностроения. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Работа актуальна, обладает научной новизной, практической ценностью. По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Головкин Сергей Алексеевич заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Корнилова Анна Владимировна

Профессор Инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов» д.т.н., доц.

Специальность, по которой была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук - 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

+7(910)422-68-45; Kornilova-av@rudn.ru

Подпись руки Корниловой Анны Владимировны удостоверяю.

Первый заместитель - заместитель

директора по научной работе

Инженерной академии РУДН,

д.т.н., доц.



/ С.А. Купреев/

31.08.2020

117198, ЮЗАО, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов». Телефон +7(495)434-53-00, E-mail: rudn@rudn.ru