

УДК 621.45.037:620.22

Д. В. ПАВЛЕНКО¹, Т. И. ПРИБОРА¹, В. Ю. КОЦЮБА^{1,2}, С. Н. ПАХОЛКА^{1,2}¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина² АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ РОТОРА КОМПРЕССОРА ГТД

Рассматриваются вопросы эффективности применения титановых сплавов, полученных путем синтеза из смеси порошковых компонентов, а также сплавов на основе алюминидов титана для деталей ротора компрессора перспективных ГТД с точки зрения запаса статической прочности и массы ротора. Показано, что наиболее перспективными материалами являются спеченные титановые сплавы, подвергнутые интенсивной пластической деформации и сплавы на основе алюминидов титана. При этом применение спеченных сплавов и технологии интенсивной пластической деформации позволяет снизить себестоимость изготовления лопаток, а применение сплавов на основе алюминидов титана – массу ротора

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессора, лопатка, ротор, интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, титановый сплав, спеченная заготовка, железоникелевый сплав, алюминиды титана

Введение

Успешное развитие современного авиационного двигателестроения тесно связано с появлением новых материалов и технологий. Основными факторами снижения удельного веса, расхода топлива и повышения мощности являются повышение температуры газа перед турбиной, степени повышения давления в компрессоре и коэффициента полезного действия отдельных узлов и ГТД в целом. Немаловажную роль в возможности повышения температур в компрессоре сыграло применение жаропрочных сплавов на никелевой основе и новых титановых сплавов. Однако, применение в конструкции компрессора жаропрочных сплавов на никелевой основе является вынужденной мерой, приводящей к увеличению веса компрессора, снижению технологичности ввиду их плохой обрабатываемости резанием и ухудшения динамики ротора [1]. Современные жаропрочные титановые сплавы имеют достаточно высокий диапазон рабочих температур, прочностные характеристики и низкий удельный вес. Однако, существующая технология их получения приводит к существенному удорожанию титановых полуфабрикатов. Особенно данная проблема актуальна для Украины, учитывая отсутствие производственных мощностей способных обеспечить серийное производство титановых полуфабрикатов.

Ведущие мировые производители авиационных двигателей уже имеют в своем арсенале легкие и жаропрочные свариваемые сплавы на основе

алюминидов титана. Это позволяет им создавать более конкурентно способные конструкции роторов компрессора. Применение в конструкции отечественных газотурбинных двигателей перспективных материалов, характеризующихся низкой себестоимостью получения и высоким уровнем свойств, позволит создавать газотурбинные двигатели не уступающие мировым аналогам.

В связи с этим в настоящее время являются актуальными исследования, направленные на разработку новых материалов с высокими эксплуатационными характеристиками и низкой себестоимостью, а также технологий повышения уровня их свойств

Анализ исследований по применению перспективных материалов в ГТД

В настоящее время ведущие мировые авиационные и двигателестроительные корпорации и научные центры разрабатывают и осваивают перспективный класс жаропрочных материалов – сплавы на основе интерметаллидов системы Ti-Al (алюминиды титана). Данный вид конструкционных материалов обладает целым рядом уникальных свойств: низкая плотность, относительно высокая температура плавления, высокий модуль упругости, стойкость к окислению и возгоранию, высокая удельная жаропрочность и др. [2, 3]. В работе [4] показана эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti₃Al и TiAl для работы

при температурах 600...800°C в авиакосмической технике с точки зрения себестоимости получения полуфабрикатов и их свойств. Однако, для оценки эффективности применения сплавов данного класса с точки зрения прочностной надежности необходима оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей ротора компрессора, что позволит оценить запасы их прочности.

Существенное снижение себестоимости изделий авиационной техники из титановых сплавов возможно путем применения заготовок деталей, полученных методами порошковой металлургии. Технологии получения заготовок деталей машин из металлических порошков уже достаточно долгое время находят широкое применение в технике. Преимущества и недостатки порошковой металлургии, в сравнении с традиционными способами получения сплавов, хорошо известны и описаны в литературе [5 – 7]. Так, известно, что низкие прочностные характеристики порошковых заготовок в первую очередь связывают с остаточной пористостью и плохой связью между частицами порошка. Для сложнелегированных сплавов актуальной задачей является и обеспечение однородности распределения легирующих элементов во всем объеме заготовок. Решение этих двух основных задач порошковой металлургии позволит существенно сократить стоимость получения титановых сплавов, расширить область их применения и, что немаловажно, позволит получать их в условиях непосредственного потребителя, т.е. на предприятиях авиационной отрасли Украины. Одной из прогрессивных технологических схем получения компактных полуфабрикатов титановых сплавов является технология интенсивного уплотнения спеченных заготовок [8 – 12]. Обладая более низкой себестоимостью (в сравнении с титановыми полуфабрикатами получаемыми по традиционной технологии переplava) эти сплавы являются привлекательными в качестве материалов для деталей ротора ГТД. Однако возможность их применения должна быть оценена путем определения коэффициентов запасов прочности деталей.

Перспективными материалами для лопаток компрессора ГТД являются также железоникелевые сплавы с нано или субмикроструктурной структурой [13, 14]. Их особенностью является то, что в процессе фрагментации структуры происходит не только измельчение зерен и увеличение доли высокоугловых границ, но дробление карбидов, являющихся концентраторами напряжений. В результате, такие сплавы отличаются не только повышенным уровнем механических свойств, но и уменьшением величины их рассеяния. Это дает возможность проектировать детали ротора более облегченной конст-

рукции при сохранении на требуемом уровне запаса прочности.

В основе эффективного применения новых конструкционных материалов (сплавы на основе алюминидов титана, порошковые сплавы, железоникелевые сплавы) лежит технология интенсивной пластической деформации (ИПД). Получившие широкое распространение в последние десятилетия различные методы ИПД [15] находят самое широкое применение для формирования в объемных заготовках субмикроструктурной структуры (СМК). Особенности структуры и свойств металлов, подвергнутых ИПД достаточно хорошо изучены [16 – 20] и являются основной причиной повышенного интереса к ним.

Анализ возможных путей применения методов ИПД в авиационном двигателестроении показывает, что наиболее перспективными являются повышение эксплуатационных характеристик конструкционных материалов для "холодной" части двигателя [21], снижение разнородности для сплавов на железоникелевой основе [14], получение присадочных материалов для восстановления моноколес и крупногабаритных лопаток вентилятора [22], а также методы ИПД актуальны для повышения технологической пластичности малоэластичных материалов, таких как спеченные титановые сплавы, сплавы на основе алюминидов титана и вторичные алюминиевые сплавы [23].

Применяемые в конструкции компрессора ГТД в настоящее время серийные титановые сплавы и сплавы на железоникелевой основе исчерпали свои возможности с точки зрения повышения прочностных характеристик путем легирования, что приводит к ограничению нагрузок на детали ГТД. В тоже время их прочность может быть повышена за счет формирования СМК структуры методами ИПД.

Особую роль играют методы ИПД для перспективных материалов лопаток компрессора – спеченных сплавов и сплавов на основе алюминидов титана [4, 24 – 26]. Так, спеченные титановые сплавы характеризуются меньшей себестоимостью по сравнению с деформированными, получаемыми по традиционной технологии. Сплавы на основе алюминидов титана обладают меньшей плотностью и большей жаропрочностью в сравнении с серийно применяемыми. Однако, невысокая ($\delta < 1...3\%$) пластичность предопределяет ряд технологических и эксплуатационных трудностей на пути их активного использования. Повышение пластичности в процессе ИПД, например винтовой экструзией, является перспективной операцией для их промышленного применения.

Исследования последних лет позволили обнаружить при винтовой экструзии вихревые потоки,

которые наблюдаются на разных масштабных уровнях деформируемого материала, от макроскопического до субмикроскопического [18, 27 – 30]. Наличие вихрей в очаге деформации является одним из основных аспектов, позволяющих реализовывать массоперенос и перемешивание в объеме образца и, таким образом, устранять ликвации легирующих элементов в литых и порошковых заготовках.

В связи с этим, исследования направленные на анализ возможности применения новых материалов и технологий для деталей ротора компрессора ГТД являются актуальными.

Цель и задачи

Целью настоящей работы являлось оценка эффективности (с точки зрения прочностной надежности) применения для деталей ротора компрессора сплавов на основе алюминидов титана, титановых

сплавов получаемых методами порошковой металлургии, а также технологии интенсивной пластической деформации заготовок деталей ротора компрессора ГТД. Основными задачами исследования являлись оценка запасов прочности и массы ротора компрессора ГТД, при использовании для деталей ротора компрессора титановых сплавов полученных методами порошковой металлургии, сплавов на основе алюминидов титана, а также заготовок, предварительно подвергнутых интенсивной пластической деформации.

Методика исследований

Анализ прочностной надежности выполняли для лопаток, дисков ротора компрессора, изготовленного из серийных и перспективных сплавов (табл. 1). Механические и физические свойства материалов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Серийные и перспективные материалы для деталей ротора компрессора ГТД

Сплав	Описание	Достоинства	Недостатки
BT8	жаропрочный титановый сплав применяемый в настоящее время для изготовления серийных лопаток ГТД.	- высокий уровень механических свойств.	- высокая стоимость; - необходимость импорта.
BT8_смк	титановый сплав BT8M после ИПД методом винтовой экструзии (ВЭ) и термической обработки. Обладает субмикроструктурной структурой с средним размером зерен 250...350 нм.	- уровень механических характеристик превышает серийный сплав BT8 на 40...50%; - высокая технологическая пластичность.	- увеличенная на 20...30% стоимость из-за необходимости проведения ИПД; - необходимость импорта.
BT8_спк	титановый сплав полученный путем синтеза их смеси порошковых компонент.	- низкая стоимость; - возможность получения в Украине.	- низкий уровень механических свойств.
BT8_спк_смк	титановый сплав полученный путем синтеза их смеси порошковых компонент методами порошковой металлургии обладающий субмикроструктурной структурой сформированной методами ИПД (ВЭ).	- низкая стоимость; - возможность получения в Украине; - высокий уровень механических свойств.	- сложность получения больших объемов заготовок; - невозможность получения крупногабаритных заготовок.
На основе интерметаллидов Ti ₃ Al, TiAl	титановые сплавы на основе алюминидов титана.	- низкий удельный вес; - высокий уровень механических свойств; - высокий уровень жаропрочности и жаростойкости.	- низкая пластичность; - сложность формования сложнопрофильных поверхностей деталей ГТД.
ЭП718-ИД	железоникелевый сплав для работы в условиях повышенных температур.	- способность работать при повышенных температурах.	- высокий удельный вес; - склонность к разнотерности.
ЭП718-ИД_смк	железоникелевый сплав для работы в условиях повышенных температур обладающий субмикроструктурной структурой сформированной методами ИПД (ВЭ).	- высокий уровень технологической пластичности исключая появление разнотерности.	- увеличенная на 20...30% стоимость из-за необходимости проведения ИПД; - отсутствие возможности получения крупногабаритных заготовок.

Примечание: смк – сплав с субмикроструктурной структурой сформированной ИПД;

спк – сплав, полученный методами порошковой металлургии из смеси порошковых компонент

Таблица 2

Серийные и перспективные материалы для деталей ротора компрессора ГТЛ

Сплав	E, МПа	ρ , кг\м ³	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	μ	δ , %	ψ , %
BT8	$1,2 \cdot 10^5$	4520	980	850	0,3	10	35
BT8_смк ¹	$1,08 \cdot 10^5$	4400	1250	1150	0,38	7	40
BT8_спк ²	$0,95 \cdot 10^5$	4000	700	450	0,1	3	17
BT8_спк_смк ²	$1,1 \cdot 10^5$	4400	940	750	0,32	7	20
Ti-46Al-5Nb-2W	$0,95 \cdot 10^5$	4200	720	650	0,3	1,6	2
ЭП718-ИД	$2 \cdot 10^5$	8290	1230	780	0,3	12	14
ЭП718-ИД_смк ²	$1,85 \cdot 10^5$	8340	1450	1020	0,32	9	20
ЭП742-ИД	$2,05 \cdot 10^5$	8320	1320	830	0,3	13	15

Примечание: ¹ свойства получены экспериментально² свойства получены по результатам моделирования³ свойства получены по результатам анализа литературных данных

Результаты исследований

Известно, что оценку эффективности применения новых материалов выполняют по величине запаса прочности [31]. Однако, для расчета запаса прочности необходима такая информация о материале как предел выносливости лабораторных образцов при рабочей температуре, амплитуда переменных напряжений в момент разрушения, а также эффективный коэффициент концентрации напряжений и их вариации. Учитывая, что на стадии анализа эффективности применения новых материалов указанные данные отсутствуют, как и механические и физические характеристики исследуемых материалов, оценку их эффективности применения для деталей ротора компрессора выполняли по изменению запасов статической прочности и массы роторов.

Запас статической прочности лопаток рассчитывали по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{экв}}}, \quad (1)$$

где n – статический запас прочности;

$\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения, МПа.

Изменение запаса статической прочности лопаток при использовании перспективных материалов выполняли относительно статического запаса прочности лопаток, изготовленных из серийного сплава (BT8 или ЭП718-ИД) по формуле:

$$\Delta = \frac{n_{\text{П}} - n_{\text{С}}}{n_{\text{С}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $n_{\text{С}}$ – статический запас прочности лопаток из серийного сплава;

$n_{\text{П}}$ – статический запас прочности лопаток из перспективного сплава.

Величину действующих напряжений определяли путем оценки НДС детали с использованием расчетного комплекса ANSYS. Расчет выполняли для условий работы ГТД на взлетном режиме.

Расчет НДС рабочих лопаток компрессора проведен на трехмерной конечно-элементной модели. Геометрия модели соответствовала чертежу. Для создания конечно-элементной модели использовали элемент второго порядка SOLID186, обеспечивающий более точные результаты расчета. Размеры конечных элементов обеспечивают высокую точность расчета.

Для анализа влияния механических и физических свойств перспективных материалов на НДС рабочей лопатки, были проведены расчеты 5-ти вариантов лопаток, изготовленных из серийных и перспективных материалов (см. табл. 1). В качестве объекта исследования выбраны рабочая лопатка третьей ступени компрессора короткоресурсного газотурбинного двигателя и лопатка шестой ступени компрессора высокого давления газотурбинного двигателя с большой степенью двухконтурности. При этом для лопаток первых ступеней, учитывая незначительные величины температур воздушного потока, альтернативными материалами являются титановые сплавы подвергнутые ИПД, титановые сплавы на основе смеси порошковых компонентов и сплавы на основе алюминидов титана. Серийным сплавом для лопаток первых ступеней компрессора принят сплав BT8. Для лопаток компрессора высокого давления альтернативными материалами является железоникелевые сплавы после ИПД и сплавы на основе алюминидов титана. Серийным сплавом для лопаток компрессора высокого давления принят сплав ЭП718-ИД.

Расчет НДС ротора компрессора выполняли на двумерной конечно-элементной модели. Геометрия

модели соответствовала чертежу ротора. Для создания конечно-элементной модели использовали элемент второго порядка PLANE82, обеспечивающий более точные результаты расчета. Размеры конечных элементов выбирали таким образом, что бы обеспечить высокую точность расчета при приемлемом времени. Расчет НДС ротора выполняли с учетом температурного поля и соответствия свойств материалов рабочим температурам.

К конечно-элементным моделям лопаток компрессора (рис. 1) прикладывали граничные условия, (по площадкам смятия моделировали условия работы лопатки в пазу диска). Частота вращения ротора составляла 39000 об/мин при расчете лопаток третьей ступени КНД короткоресурсного ГТД и 9300 об/мин при расчете лопаток шестой ступени КВД,

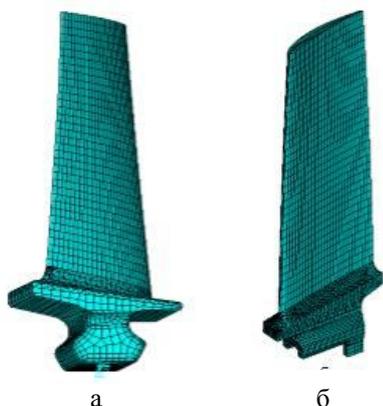


Рис. 1. Конечно-элементная модель лопатки 3-й ступени компрессора низкого давления (а) и 6-й ступени компрессора высокого давления (б)

Анализ полей распределения радиальных и эквивалентных напряжений показывает, что независимо от применяемого материала поля распределения напряжений в пера и хвостовике идентичны. При этом максимальные напряжения пера лопатки находятся в корневом сечении, максимальные напряжения хвостовика - в самом узком месте хвостовика (рис. 2). Значения напряжений в лопатках из исследуемых материалов приведены в табл. 3.

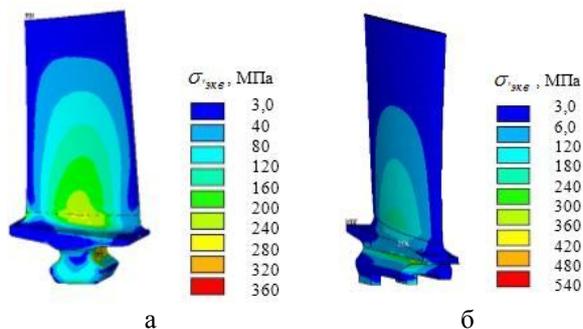


Рис. 2. Поля напряжений в лопатках 3-й ступени компрессора низкого давления (а) и 6-й ступени компрессора высокого давления (б)

Таблица 3
Результаты расчета на прочность лопаток

Сплав	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	n^c , ед.	Δ , %
BT8 (серийный для лопаток КНД)	369	2,31	–
BT8_смк	340	3,38	46,3
BT8_спк	335	1,34	-41,9
BT8_спк_смк	356	2,10	-9,0
Ti-46Al-5Nb-2W (для лопаток 3-й ступени КНД)	313	2,07	-10,4
ЭП718-ИД (серийный для лопаток КВД)	530	1,47	–
ЭП718-ИД_смк	546	1,86	26,5
Ti-46Al-5Nb-2W (для лопаток КВД)	246	2,64	79,5

Учитывая, что на величину эквивалентных напряжений, действующих в лопатках компрессора в процессе работы комплексно оказывают влияние такие факторы как, плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, для сравнительного анализа возможности применения перспективных материалов рассчитывали запасы статической прочности (см. табл. 3).

Анализ расчетных величин запасов статической прочности лопаток компрессора низкого и высокого давления показывает, что применение для титановых и жаропрочных сплавов предварительной обработки методами интенсивной пластической деформации, за счет формирования в объеме заготовки СМК структуры, позволяет увеличить запас статической прочности по сравнению с серийными материалами/. При этом, за счет добавления в технологический процесс операций ИПД, себестоимость изготовления лопаток увеличится. Однако, повышение уровня физических и механических свойств при сохранении пластичности материала, является значительным резервом для оптимизации конструкции лопаток с целью снижения их массы и улучшения аэродинамических характеристик.

Применение полуфабрикатов титановых сплавов, полученных методами порошковой металлургии путем предварительного прессования и вакуумного спекания для изготовления рабочих лопаток компрессора приводит к снижению запаса статической прочности на 41,9%. Такое снижение запаса в основном объясняется незначительным уровнем прочностных свойств спеченных полуфабрикатов в связи с наличием в них пор и ликваций легирующих элементов. Также спеченные полуфабрикаты характеризуются низкой пластичностью и значительным рассеянием величин прочности и пластичности. Таким образом, не смотря на значительное снижение себестоимости получения спеченных титановых

полуфабрикатов, в сравнении с деформируемыми полуфабрикатами полученные по традиционной технологии переплава, их использование должно быть ограничено ненагруженными деталями ГТД.

Использование для лопаток КВД сплавов на основе алюминидов титана и технологии ИПД приводит к значительному увеличению запаса их статической прочности (см. табл. 3).

Применение к спеченным титановым полуфабрикатам дополнительной обработки давлением (одним из методов интенсивной пластической деформации) – винтовой экструзии, позволяет значительно повысить их прочностные характеристики, и показатели пластичности, а также снизить рассеяние указанных величин. Известно [32], что в процессе винтовой экструзии наблюдается устранение пористости заготовок, гомогенизация легирующих элементов и формирование субмикроструктурной структуры. Учитывая относительно низкую себестоимость получения спеченных полуфабрикатов и трудоемкость операции винтовой экструзии можно предполагать, что применение таких материалов является оправдано как с экономической, так и технической точек зрения. Перспективными в настоящее время являются и активно развивающиеся методы интенсивной пластической деформации, характеризующиеся более низкими технологическими затратами по сравнению с винтовой экструзией [15]. Их использование для спеченных титановых заготовок позволит снизить затраты на технологическую оснастку и, таким образом, применять их для серийного изготовления лопаток компрессора.

Анализ эффективности применения для рабочих лопаток КНД и КВД сплавов на основе алюминидов титана показывает, что при этом снижение массы ротора сопровождается снижением запаса прочности в пределах 10%. Таким образом основной эффект от их применения заключается в снижении массы ротора.

Принимая во внимание, что ряд перспективных материалов, например таких как современные сплавы на основе алюминидов титана, могут быть использованы не только для лопаток, выполнили анализ НДС ротора компрессора. Исследовали влияние замены материала дисков последних ступеней ротора КВД, изготавливаемых в связи с особенностями условий работы из жаропрочных сплавов на никелевой основе, сплавами на основе алюминидов титана.

Анализ температурных полей ротора КВД позволил оценить диапазоны изменения рабочих температур элементов ротора КВД (рис. 3).

Установлено, что диски первых четырех ступеней ротора барабанного типа, изготовлены из титанового сплава ВТ8-1, работают в диапазоне температур 160...400 °С. Диски последующих ступеней ротора работают в диапазоне температур 360...563 °С (рис. 4), что обуславливает в настоящее время применение для их изготовления жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Основными недостатками используемого на сегодняшний день для изготовления дисков последних ступеней КВД сплава ЭП742-ИД, является его высокая плотность, что приводит к значительной массе ротора, а также невозможность сваривания его отдельных ступеней. В силу этих причин в настоящее время используют ротор КВД, в котором диски собираются в барабан при помощи болтовых соединений. Это приводит к увеличению массы ротора, числа критических зон рассматриваемых деталей и номенклатуры деталей.

Для анализа эффективности применения при изготовлении роторов КВД сплавов на основе алюминидов титана выполняли расчет НДС ротора серийной и перспективной конструкций. Оценивали изменение запасов статической прочности основных деталей и массы ротора. Массу ротора рассчитывали с учетом применения перспективных материалов для изготовления как дисков ротора, так и рабочих лопаток.

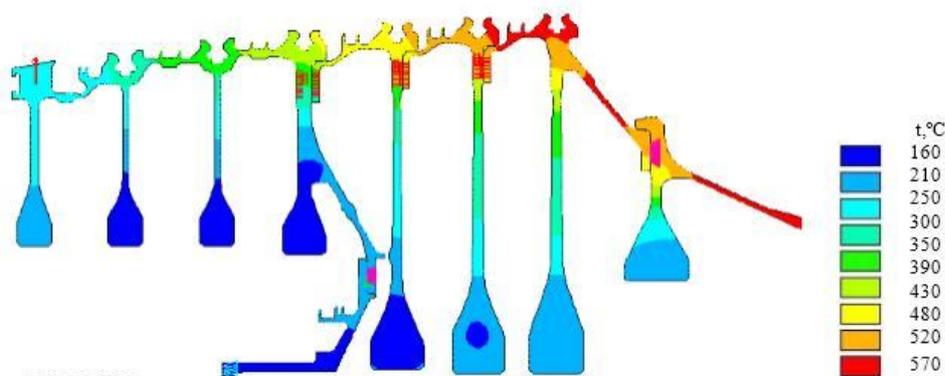


Рис. 3. Температурное поле ротора КВД

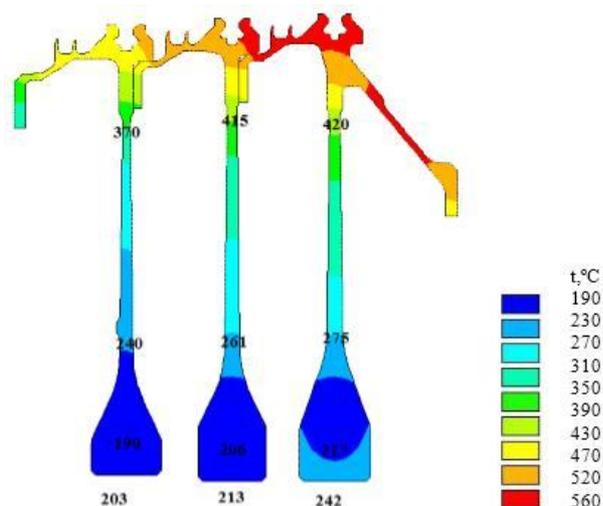


Рис. 4. Температурное поле дисков 5-7 ступеней ротора КВД

Напряженно-деформированное состояние серийного ротора КВД, профиль дисков в котором оптимизирован с учетом необходимости обеспечения назначенного ресурса ГТД показан на рис. 5.

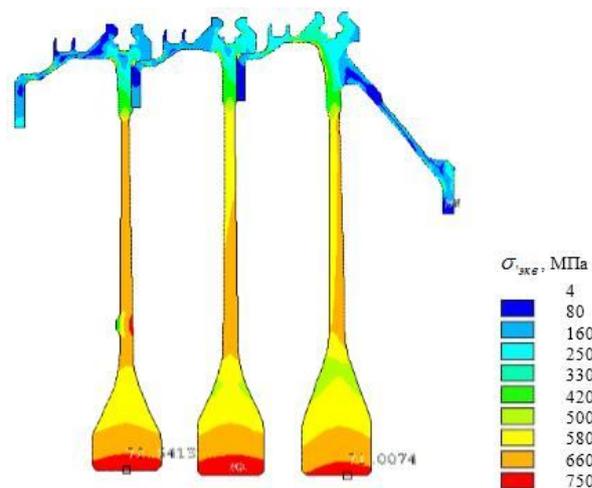


Рис. 5. Поле эквивалентных напряжений в дисках 5-7 ступеней КВД, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП742-ИД

Анализ физических, механических и специальных свойств перспективных материалов, а также особенностей технологии их получения показал, что альтернативой жаропрочным сплавам на никелевой основе являются сплавы на основе алюминидов титана, диапазон рабочих температур которых ограничивается 700 °С. Учитывая, что плотность перспективного сплава почти в 2 раза меньше плотности серийно применяемого сплава ЭП742-ИД, в конструкцию дисков возможно внесение изменений, позволяющих уменьшить объем дисков путем исключения ступичной зоны. Применение перспективных сплавов для рабочих лопаток вместо серий-

но применяемого сплава ЭП718-ИД, позволяет снизить контурную нагрузку на ротор в два раза.

Расчет модифицированной части ротора, с температурным полем и центробежными нагрузками показал, что уровень напряжений в деталях ротора снизился (рис. 6).

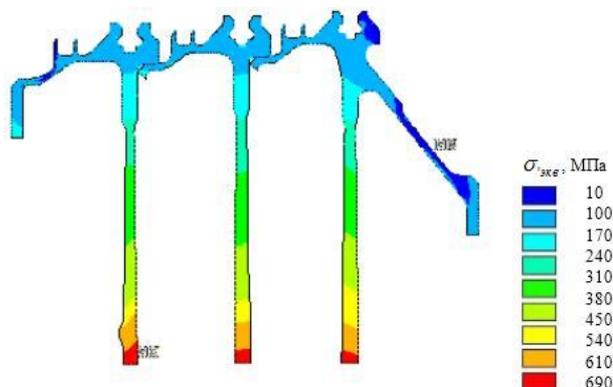


Рис. 6. Поле эквивалентных напряжений в дисках 5-7 ступеней КВД, изготовленных из сплава на основе алюминидов титана

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Анализ изменения массы рассматриваемой части ротора показал, что масса рабочих колес с использованием перспективных сплавов на основе алюминидов титана снижается на 66% в сравнении с аналогичным ротором, изготовленным из сплавов ЭП742-ИД и ЭП718-ИД. Для рассматриваемого ротора КВД снижение массы составляет 26 кг, что позволяет не только снизить массу ротора, но и существенно уменьшить динамические нагрузки, вызванные остаточным дисбалансом ротора. Принимая во внимание, что предлагаемый материал обладает хорошей свариваемостью, то эффективность его внедрения в конструкцию КВД будет еще выше, так как пропадет необходимость в усиленных фланцах и крепежных элементах.

Таким образом, проведенный анализ статической прочности лопаток КНД, КВД и ротора компрессора позволяет сделать выводы об эффективности и целесообразности их применения для изготовления деталей роторов компрессора ГТД. Так, с точки зрения снижения себестоимости изготовления лопаток наиболее перспективными материалами являются спеченные титановые сплавы подвергнутые интенсивной пластической деформации. Перспективным является также применение сплавов на основе алюминидов титана, позволяющие значительно снизить массу ротора.

Выполненная оценка эффективности применения перспективных материалов и технологий для деталей ротора компрессора ГТД основывается на расчете запаса статической прочности и массы конструкции. Для более детальной оценки необходимо выполнить расчет запасов прочности деталей по переменным напряжениям, который требует наличия информации о действующих переменных напряжениях, их вариации, а также пределов выносливости лабораторных образцов из исследуемых материалов и значения эффективного коэффициента концентрации напряжений. Таким образом, перспективами дальнейших исследований, является проведение комплекса мероприятий по изучению свойств сплавов при переменных нагрузках, диссипативных свойств, циклической трещиностойкости, а также влияния технологической наследственности.

Литература

1. Boguslaev, V. A. Strain hardening and fatigue resistance of high-resistance alloy EK79-ID [Text] / V. A. Boguslaev, D. V. Pavlenko // Metal science and heat treatment. – 2008. – Vol. 50, № 1-2. – P. 7-12.
2. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства [Текст] : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
3. Теплофизические характеристики γ -сплава алюминид титана [Текст] / К. Б. Исаев, А. А. Рогозинская, С. В. Ахонин [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 128-131.
4. Иванов, В. И. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti3Al и TiAl для работы при температурах 600-800°C в авиакосмической технике [Текст] / В. И. Иванов, К. К. Ясинский // Технология легких сплавов. – 1996. – №3. – С. 12-25.
5. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес [и др.] // Порошковая металлургия. – 2000. – №7/8. – С. 54-64.
6. Ивасишин, О. М. Экономичная технология получения титановых деталей методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, А. П. Шпак, Д. Г. Саввакин // Титан. – 2006. – № 1. – С. 31-39.
7. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомашиностроительного применения [Текст] / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева [и др.] // Наука та інновації. – 2005. – Т. 1, № 2. – С. 44-57.
8. Винтовая экструзия порошковых заготовок. Ч.1. Численный анализ методом конечного элемента [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18, № 1. – С. 69-82.
9. Винтовая экструзия порошковых заготовок. Ч.2. Эксперимент и обсуждение результатов [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18, № 3. – С. 92-97.
10. Павленко, Д. В. Уплотнение спеченных титановых заготовок гидроэкструзией [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 1 – С. 12-18.
11. Павленко, Д. В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок [Текст] / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения – 2015. – № 1 – С. 87-93.
12. Павленко, Д. В. Альтернативные схемы технологического процесса получения полуфабрикатов для лопаток ГТД методами порошковой металлургии [Текст] / Д. В. Павленко // Технологические системы. – 2014. – № 4 – С. 51-57.
13. Павленко, Д. В. Формирование субмикрористаллической структуры в серийных и перспективных материалах лопаток ГТД [Текст] / Д. В. Павленко, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10 (127). – С. 33-39.
14. Устранение разнородности в лопатках компрессора ГТД интенсивной пластической деформацией [Текст] / В. А. Богуслаев, В. Ю. Коцюба, Д. В. Павленко [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 80. – Днепропетровск : ПГАСА, 2015. – С. 373-379.
15. Алтухов, А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках [Текст] / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 54-59.
16. Бейгельзимер, Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
17. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы : получение, структура и свойства [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.
18. Useful properties of twist extrusion [Text] / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov [et al] // Materials Science and Engineering A 503. – 2009. – P. 14-17.
19. Утяшев, Ф. З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении [Текст] / Ф. З. Утяшев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 7-11.

20. Совершенствование конструкций штамповой оснастки, средств автоматизации и прессового оборудования для реализации процесса винтовой экструзии [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, А. Ф. Тарасов, Р. Ю. Кулагин [и др.] // *Обработка материалов давлением*. – 2013. – № 4 (37). – С. 184-189.

21. Формирование субкристаллической структуры в сложнолегированных титановых сплавах [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2009. – № 7. – С. 240-244.

22. Дифференцированный подход к оценке запасов прочности деталей газотурбинных двигателей восстановленных методами сварки [Текст] / А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан [и др.] // *Технологические системы*. – 2013. – № 1. – С. 7-13.

23. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов [Текст] / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин [и др.]. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 270 с.

24. Павленко, Д. В. Технично-экономические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников // *Вестник двигателестроения*. – 2014. – № 1. – С. 98-103.

25. Куликовский, Р. А. Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиадвигателестроении [Текст] / Р. А. Куликовский, С. Н. Пахолка, Д. В. Павленко // *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 80. – Днепрпетровск : ПГАСА, 2015. – С. 369-372.*

26. Павленко, Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов [Текст] / Д. В. Павленко // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. науч. пр. – Вып. 15. – Житомир : Вид-во ЖДТУ, 2015. – С. 1-14.*

27. Cross Flow During Twist Extrusion: Theory, Experiment, and Application [Text] / R. Kulagin, M. Latypov, H. S. Kim [at al.] // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2013. – Vol. 44. – P. 3211-3220

28. Beygelzimer, Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation [Text] / Y. Beygelzimer // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 683. – P. 213-224

29. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method [Text] / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov [at al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 3650-3656

30. Pavlenko, D. V. Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion [Text] / D. V. Pavlenko, Ya. E. Beygel'zimer // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2016. – P. 1-8.

31. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность [Текст] : руководство и справ. пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев,

Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.

32. Pavlenko, D. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT1-0 Alloy in Different States [Text] / D. V. Pavlenko, A. V. Ovchinnikov // *Materials Science*. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 52-60.

References

1. Boguslaev, V. A., Pavlenko, D. V. Strain hardening and fatigue resistance of highresistance alloy EK79ID. *Metal science and heat treatment*, 2008, vol. 50, no. 1-2, pp. 7-12.

2. Il'in, A. A., Kolachev, B. A., Pol'kin, I. S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* [Titanium alloys. The composition, structure and properties]. Moscow, VILS MATI Publ., 2009. 520 p.

3. Isaev, K. B., Rogozinskaya, A. A., Akhonin, S. V. Teplofizicheskie kharakteristiki γ -splava aluminida titana [Thermal characteristics of γ -titanium aluminide alloy]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 10 (67), pp. 128-131.

4. Ivanov, V. I., Yasinskii, K. K. Effektivnost' primeneniya zharoprochnykh splavov na osnove intermetallidov Ti3Al i TiAl dlya raboty pri temperaturakh 600-800 v aviakosmicheskoi tekhnike [The effectiveness of heat-resistant alloys based on intermetallic compounds and Ti3Al TiAl to work at temperatures of 600-800 in aerospace engineering]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1996, no. 3, pp. 12-25.

5. Ivasishin, O. M., Savvakina, D. G., Froes, F. Sintez splava Ti6Al4V s nizkoi ostatnochnoi porositost'yu metodom poroshkovoi metallurgii [Synthesis alloy Ti-6Al-4V with low residual porosity by powder metallurgy]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 2000, no. 78, pp. 54-64.

6. Ivasishin, O. M., Shpak, A. P., Savvakina, D. G. Ekonomichnaya tekhnologiya polucheniya titanovykh detalei metodom poroshkovoi metallurgii [Cost-effective technology for producing titanium components by powder metallurgy]. *Titan*, 2006, no. 1, pp. 31-39.

7. Ivasishin, O. M., Savvakina, D. G., Bondareva, K. A. Proizvodstvo titanovykh splavov i detalei ekonomichnym metodom poroshkovoi metallurgii dlya shirokomasshtabnogo promyshlennogo primeneniya [Production of titanium alloys and components by powder metallurgy economical for large-scale industrial applications]. *Nauka ta innovatsii*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 44-57.

8. Beigel'zimer, Ya. E., Mikhailov, O. V., Synkov, A. S. Vintovaya ekstruziya poroshkovykh zagotovok. Ch.1. Chislennyi analiz metodom konechnogo elementa [Twist Extrusion powder blanks. P.1. Numerical finite element analysis]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*, 2008, vol. 18, no. 1, pp. 69-82.

9. Beigel'zimer, Ya. E., Mikhailov, O. V., Synkov, A. S. Vintovaya ekstruziya poroshkovykh zagotovok. Ch.2. Eksperiment i obsuzhdenie rezul'tatov

[Twist Extrusion powder blanks. P.2. Experiment and discussion of results]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*, 2008, vol. 18, no. 3, pp. 92-97.

10. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V. Uplotnenie spechennykh titanovykh zagotovok gidroekstruziei [Seal the sintered titanium billets hydroextrusion]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2016, no. 1, pp. 12-18.

11. Pavlenko, D. V. Tekhnologicheskie metody uplotneniya spechennykh titanovykh zagotovok [Technological methods of sealing the sintered titanium billets]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 87-93.

12. Pavlenko, D. V. Alternativnye skhemy tekhnologicheskogo protsessa polucheniya polufabrikatov dlya lopatok GTD metodami poroshkovoi metallurgii [Alternative schemes of technological process of semi-finished products for turbine engine blades by powder metallurgy]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2014, no. 4, pp. 51-57.

13. Pavlenko, D. V., Kotsyuba, V. Y., Pakholka, S. N. Formirovanie submikrokristallicheskoj struktury v seriinykh i perspektivnykh materialakh lopatok GTD [Formation submicrocrystalline structure in production and advanced materials of gas turbine engine blades]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, vol. 10 (127), pp. 33-39.

14. Boguslaev, V. A., Kotsyuba, V. Y., Pavlenko, D. V., Tkach, D. V. Ustranenie raznozernistosti v lopatkakh kompressora GTD intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Elimination of assorted blades in the compressor GTE severe plastic deformation]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroyeniye : sb. nauch. tr. – Building, material science, mechanical engineering. Proc. Int. Symp.*, Dnepropetrovsk PGASA Publ., 2015, vol. 80, pp. 373-379.

15. Altukhov, A. V., Tarasov, A. F., Perig, A. V. Sistematzatsiya protsessov intensivnogo plasticheskogo deformirovaniya dlya formirovaniya ul'tramelkozernistykh i nanokristallicheskikh struktur v ob'emnykh zagotovkakh [Ordering of severe plastic deformation for the formation of ultrafine and nanocrystalline structures in bulk blanks]. *Pis'ma o materialakh*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 54-59.

16. Beigel'zimer, Y. E., Varyukhin, V. N., Orlov, D. V. Vintovaya ekstruziya protsess nakopleniya deformatsii [Twist Extrusion - strain accumulation process]. Donetsk, Firma TEAN Publ., 2003. 87 p.

17. Valiea, R. Z., Aleksandrov, I. V. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk Nanostructured Metallic Materials: Preparation, Structure and Properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 397 p.

18. Beygelzimer, Y., Varyukhin, V., Synkov, S., Orlov, D. Useful properties of twist extrusion. *Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 503, pp. 14-17.

19. Utyashev, F. Z. Deformatsionnye metody polucheniya nanostrukturirovannykh materialov i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya v aviadvigatelestroenii [Expansion methods for nanostructured materials and their possible use in aircraft engine]. *Aviatsionno-*

kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2009, no. 10 (67), pp. 7-11.

20. Beigel'zimer, Y. E., Tarasov, A. F., Kulagin, R. Y. Sovershenstvovanie konstruksii shtampovoi osnastki, sredstv avtomatizatsii i pressovogo oborudovaniya dlya realizatsii protsessa vintovoi ekstruzii [Improving the structures die tooling, automation equipment and press equipment for the realization of a screw extrusion process]. *Obrabotka materialov davleniem*. Kramatorsk, DGMA Publ., 2013, no. 4 (37), pp. 184-189.

21. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V., Kachan, A. Y. Formirovanie subkristallicheskoj struktury v slozhnolegirovannykh titanovykh splavakh [Formation subkristallicheskoj structure in the complex-titanium alloys]. *Perspektivnye materialy*, 2009, no. 7, pp. 240-244.

22. Ovchinnikov A. V., Pavlenko, D. V., Kachan, A. Y. Differentsirovannyi podkhod k otsenke zapasov prochnosti detalei gazoturbinykh dvigatelei vosstanovlennykh metodami svarki [A differentiated approach to the assessment of safety margins of parts of gas turbine engines recovered welding methods]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2013, no. 1, pp. 7-13.

23. Shevelev, A. I., Beigel'zimer, Y. E., Varyukhin, V. N. *Deformatsionnaya obrabotka vtorichnogo alyuminiya i alyuminii sodershashchikh otkhodov* [The deformation processing of secondary aluminum, and aluminum-containing waste]. Donetsk, Noulidzh Publ., 2010. 270 p.

24. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V. Tekhnikoekonomicheskie aspekty tekhnologicheskikh skhem polucheniya zagotovok iz titanovykh splavov dlya lopatok GTD [Technical and economic aspects of the technological schemes of production of billets of titanium alloys for turbine engine blades]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2014, no. 1, pp. 98-103.

25. Kulikovskii, R. A., Pakholka, S. N., Pavlenko, D. V. Perspektivy promyshlennogo primeneniya alyuminidov titana v aviadvigatelestroenii [The prospects of industrial applications in aircraft engine titanium aluminate] *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroyeniye : sb. nauch. tr. – Building, material science, mechanical engineering. Proc. Int. Symp.*, Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2015, vol. 80, pp. 369-372.

26. Pavlenko, D. V. Povyshenie tekhnologicheskoi plastichnosti spechennykh titanovykh splavov [Increasing the technological plasticity of the sintered titanium alloys]. *Protsesi mekhanichnoi obrobki v mashinobudovanni*, 2015, vol. 15, pp. 1-14.

27. Kulagin, R., Latypov, M., Kim, H.S., Varyukhin, V., Beygelzimer Y. Cross Flow During Twist Extrusion: Theory, Experiment, and Application. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, vol. 44, pp. 3211-3220

28. Beygelzimer, Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 683, pp. 213-224

29. Beygelzimer, Y., Reshetov, A., Synkov, S., Prokof'eva, O., Kulagin R. Kinematics of metal flow

during twist extrusion investigated with a new experimental method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 3650-3656.

30. Pavlenko, D. V., Beygel'zimer, Y. E. Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2016. 18 p.

31. Serensen, S. V., Kogaev, V. P., Shneiderovich, R. M. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detalei*

ماشین‌ها پروچنوست' [Bearing capacity and calculation of machine components for durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 488 p.

32. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT10 Alloy in Different States. *Materials Science*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 52-60.

Поступила в редакцію 14.04.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ РОТОРУ КОМПРЕСОРА ГТД

Д. В. Павленко, Т. І. Прибора, В. Ю. Коцюба, С. М. Пахолка

Розглядаюся питання ефективності застосування титанових сплавів, отриманих шляхом синтезу з суміші порошкових компонентів, а також сплавів на основі алюмінідов титану для деталей ротору компресора перспективних ГТД з точки зору запасу статичної міцності і маси ротора. Показано, що найбільш перспективними матеріалами є спечені титанові сплави, які піддані інтенсивній пластичній деформації і сплави на основі алюмінідов титану. При цьому застосування спечених сплавів і технології інтенсивної пластичної деформації дозволяє знизити собівартість виготовлення лопаток, а застосування сплавів на основі алюмінідов титану - масу ротора.

Ключові слова: газотурбінний двигун, компресор, лопатка, ротор, інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, титановий сплав, спечена заготовка, залізонікелевий сплав, алюмініди титану

THE ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR DETAILS OF GTE ROTOR OF COMPRESSOR

D. V. Pavlenko, T. I. Pribora, V. Ju. Kotsjuba, S. N. Paholka

This research looks at the use of future-oriented, promising materials for the manufacture of rotor turbine engine compressor components. It studies powder alloys, the alloys based on aluminide titanium, and superalloys. It also considers the effect of severe plastic deformation technology. The research shows that the use of those materials and technologies will allow to reduce the cost and weight of the rotor turbine engine

Key words: gas turbine engine, compressor, blade, rotor, severe plastic deformation, twist extrusion, titanium alloy, sintered preform, superalloys, aluminide titanium.

Павленко Дмитрій Вікторович - канд. техн. наук, доцент, доцент каф. технології авіаційних двигателів Запорожського національного технічного університету, Запорожье, Україна, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Прибора Татьяна Ивановна – ст. преп. каф. технології авіаційних двигателів Запорожського національного технічного університету, Запорожье, Україна.

Коцюба Віктор Юрьевич – аспірант каф. технології авіаційних двигателів Запорожського національного технічного університету; заступник технічного директора АО "Мотор Сич", Запорожье, Україна.

Пахолка Сергей Николаевич – аспірант каф. технології авіаційних двигателів Запорожського національного технічного університету; начальник цеха АО "Мотор Сич", Запорожье, Україна.

Pavlenko Dmytro Viktorovich – Ph.D., Associate Professor, Docent, Aircraft engines technologies department, Zaporizhzhya National Technical University, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Pribora Tat'jana Ivanovna – senior lecturer, Aircraft engines technologies department, Zaporizhzhya National Technical University.

Kotsjuba Viktor Jur'evich – graduate student, Aircraft engines technologies department, Zaporizhzhya National Technical University; Deputy Technical Director of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine.

Paholka Sergej Nikolaevich – graduate student, Aircraft engines technologies department, Zaporizhzhya National Technical University; Head of department of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine.