

ОЦЕНКА РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТИТАНОВЫХ МОНОКОЛЕС АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Показана методика оценки запасов прочности осевого моноколеса авиадвигателя, позволяющая реализовать материаловедческий подход к формированию заданного типа структуры в зонах, восстановленных наплавкой, что дает возможность дифференцированного увеличения уровня механических свойств для повышения ремонтпригодности детали в целом.

Ключевые слова: моноколесо, запас прочности, наплавка, восстановление, титановый сплав, субмикроскопическая структура.

Введение

В авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) последних поколений как зарубежного, так и отечественного производства, широко применяются жаропрочные титановые сплавы [1–3]. Такие сплавы преимущественно используются в «холодной» части двигателя для ответственных деталей роторного назначения (моноколеса, лопатки вентилятора и компрессора, диски), определяющие ресурс двигателя в целом [4]. Поэтому, экономическая эффективность применения деталей из титановых сплавов в первую очередь определяется сроком их службы, непосредственно связанным с возможностью их восстановления в процессе ремонта [5].

Основным отличием моноколес компрессоров современных ГТД, от рабочих колес компрессоров с наборными лопатками, является отсутствие возможности поддетальной замены поврежденных элементов (диска и лопаток). Поэтому при их ремонте на первый план выходят вопросы, связанные со сваркой и наплавкой.

Таким образом, пути продления срока службы находятся в области применения методов сварки титановых сплавов. Известно, что жаропрочные титановые сплавы имеют плохую свариваемость, что не дает возможности обеспечения высокого уровня всего спектра механических свойств сварных соединений [6].

Анализ напряженно-деформированного состояния ряда сложно нагруженных деталей [7, 8, 9] показывает, что при эксплуатации в различных зонах одной и той же детали возникают разные по характеру и интенсивности напряжения. В связи с этим для обеспечения работоспособности детали в целом достаточно обеспечить необходимый уровень механических свойств в восстанавливаемом участке. Полученные в работах [5, 6] результаты показали возможность существенного повышения уровня механических свойств сварных соединений путем применения субмикроструктурных присадок и дифференцированного подхода к формированию структуры и свойств сварных соединений $\alpha + \beta$ - титановых сплавов.

Для определения ремонтпригодности таких деталей как моноколеса необходимо оценить конкретные значения величины запаса прочности в каждой зоне детали. Как известно, расчет запаса прочности выполняется на основе информации о прочностных характеристиках материала, а также напряженно-деформированного состояния (НДС) детали. В настоящее время наиболее прогрессивным методом оценки НДС сложнопрофильных деталей является моделирование. Широкое применение находят методы моделирования с применением конечно-элементного анализа [10, 11]. В работе [5] показано, что основными критериями при выборе новых подходов ремонта являются результаты моделирования. Однако получаемые при моделировании результаты дают возможность преимущественно конструкторской оценки, в основу которой, как правило, положены справочные свойства материалов. Более точную оценку работоспособности детали можно получить с учетом экспериментальных данных по свойствам конкретного конструкционного материала. При сварке и наплавке происходит изменение свойств материала. Физические свойства материала изменяются в небольшом диапазоне. Влияние структурных факторов в расчетах практически не учитывается. В тоже время структура является одним из определяющих факторов в формировании механических свойств материала.

Целью настоящей работы являлась оценка запасов прочности осевых моноколес из сплава ВТ8 с измененными свойствами в области наплавленного слоя, полученного с применением стандартных и опытных присадок, для определения зон возможного ремонта на примере осевого моноколеса.

Методы исследования, оборудование

Предложен дифференцированный подход при определении и обеспечении запасов прочности моноколес, восстановленных наплавкой, основан на анализе поля напряжений от статических и переменных нагрузок. При этом учитывались следующие предпосылки:

- запасы прочности моноколес ГТД установлены нормативами документами;
- при восстановлении геометрии пера лопаток моноколеса наплавкой запас прочности должен быть обеспечен на заданном уровне для всех зон пера;
- различные зоны пера подвергались действию различных по величине и характеру нагрузок.

Для оценки НДС моноколеса выполняли прочностной и модальный анализ методом конечных элементов в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Твердотельную модель лопатки создавали в системе автоматизированного проектирования UNIGRAFICS NX. Расчет выполняли на кластерной системе, состоящей из 6 узлов, соединенных между собой сетевым интерфейсом. В моноколесе выполняли построение комбинированной конечно-элементной сетки, состоящей из 10-узловых тетраэдров и 20-узловых гексаэдров. Использовали трехмерные квадратичные тетраэдральные прочностные конечные элементы SOLID 186. Для предварительного разбиения плоскостей использовали 8-ми узловой конечный элемент SHELL 281.

В зависимости от необходимости получения максимального сопротивления разрушения при различных типах нагрузки с учетом функционального назначения восстанавливаемых изделий использовали один из составов опытных присадочных материалов [12, 13]. Сплавы с лантаном и с бором рекомендовано использовать при восстановлении лопаточной части моноколес, где преобладают максимальные статические и динамические нагрузки и необходима максимальная пластичность (**состав № 1**, %, масс.: Ti – основа, 3...4 Al, 0,125...0,20 La, 0,01...0,02 Y, 0,02...0,04 B, Ti). Это позволило повысить ресурс изделий до образования усталостных трещин (лопаточная часть моноколес). Сплавы с иттрием и минимальным содержанием лантана и бора (**состав № 2**, %, масс.: Ti – основа, 3...4 Al, 0,01...0,10 La, 0,05...0,08 Y, 0,01...0,15 B) использовали при восстановлении дисковой части моноколес, воспринимающая максимальные нагрузки при наличии трещины.

Результаты исследований, их обсуждение

Основной принципиальной особенностью расчета моноколеса являлись различные требования, предъявляемые к лопаточной и дисковой части детали. Для расчетов лопаточной части применяли присадочный материал № 1, обеспечивающий максимальное сопротивление статическим и динамическим нагрузкам. Для расчета дисковой части моноколеса использовали результаты расчетов механических свойств сварных соединений сплава BT8 с дисковой структурой, полученных с применением другого присадочного материала № 2. Это обеспечило выполнения условия сохранения достаточного уровня сопротивления материала развитию трещины, а именно величины КСТ сварного шва не ниже основного металла. Построение модели моноколеса выполняли в системе UNIGRAFICS 6. Полная 3D модель моноколеса показана на рис. 1.

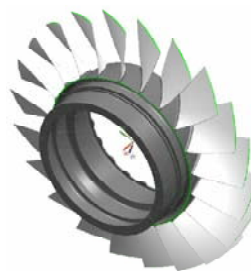


Рис. 1. 3D модель моноколеса из сплава BT8 1-ст КНД Д-27

При создании конечно элементной модели моноколеса компрессора с целью снижения количества конечных элементов расчет выполняли с использованием циклической симметрии (1/21 колеса). С учетом циклической симметрии рассмотрен базовый сектор с углом (360/17). Расчетная модель представляла собой сектор моноколеса, включающий в себя перо одной лопатки, элементы ступичной части моноколеса и гребешки лабиринтного уплотнения. Для построения в модели сектора моноколеса качественной сетки конечных элементов модель была разбита на элементарные объемы (рис. 2).

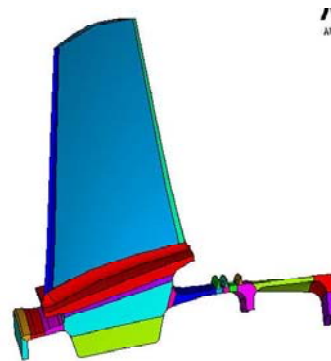


Рис. 2. Объемы в модели лопатки моноколеса из сплава BT8 двигателя Д-27

В секторе моноколеса выполнялось построение комбинированной конечно-элементной сетки состоящей из 10-узловых тетраэдров и 20-узловых гексаэдров. Использовали трехмерные квадратичные тетраэдральные прочностные конечные элементы SOLID 186. Для предварительного разбиения плоскостей использовали 8-ми узловой конечный элемент SHELL 281 (рис. 3).



Рис. 3. Конечно-элементная модель сектора моноколеса из сплава BT8

В расчетной модели создана регулярная сетка конечных элементов за исключением переходной зоны «перо-хвостовик», в которой используется свободная сетка конечных элементов. Для достижения оптимальной формы конечных элементов выполнялось разбиение объемов модели плоскостями для получения объемов элементарной формы. Общее число объемов в модели составляет порядка 190 шт., конечных элементов – 20979 шт, узлов – 83151 шт. Схема задания граничных условий при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) пера и дисковой части моноколеса компрессора из сплава ВТ8 двигателя Д-27 приведена на рис. 4.

Для описания поведения основного материала лопатки и материала наплавленного слоя использовали линейную и билинейную изотропные модели материала. Для оценки влияния модуля упругости наплавленного слоя выполнялось его варьирование в широком диапазоне.

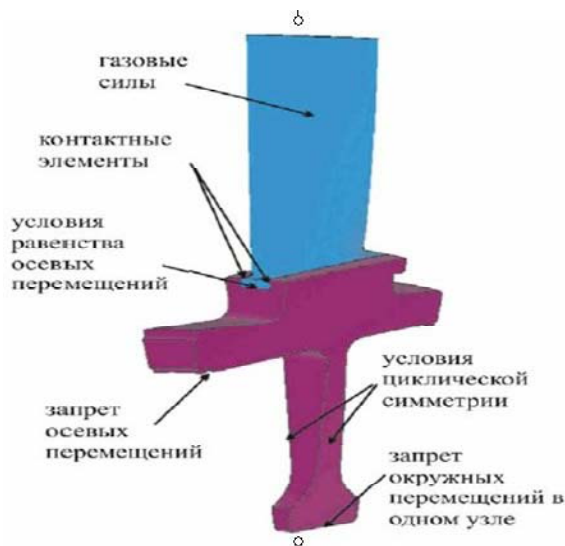


Рис. 4. Схема задания граничных условий при оценке НДС моноколеса компрессора из сплава ВТ8 двигателя Д-27

Свойства основного материала (линейная модель ВТ8): модуль упругости $E = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$; плотность $\rho = 4480$ кг/м³. Свойства наплавленного материала (при наплавке лопатки припадочным материалом состава № 1): модуль упругости $E = 9,7 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона $\mu = 0,34$; плотность $\rho = 4300$ кг/м³; напряжение течения $\sigma_T = 3,5 \cdot 10^8$ Па; касательный модуль упругости – $E' = 3,57 \cdot 10^{10}$ Па.

Расчет НДС осевого моноколеса из сплава ВТ8 двигателя Д-27 выполняли при нагрузках, соответствующих работе двигателя на взлетном режиме. Учитывая, что моделируемое расстояние от оси вращения колеса (ось Z) до пера лопатки соответствует радиусу натурального колеса компрессора, расчетный сектор при задании угловой скорости нагружается силами инерции от собственной массы. Для исключения возможного пе-

ремещения расчетной модели в осевом направлении, перемещение одного из узлов на переднем фланце во всех направлениях ограничено. Для определения частот и мод собственных колебаний конструкции применяли линейный частотный анализ: тип анализа – модальный; метод – Block Lanczos; число определяемых мод – 3; исследованный диапазон частот – 0–11000 Гц. Условия закрепления – ограничение перемещений по боковым поверхностям сектора (поверхностям выреза). Частоты собственных колебаний лопаток без наплавки приведены в табл. 1. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния сектора моноколеса с учетом наплавки входной и выходной кромки для узлов модели показаны на рисунках 5–6.

Таблица 1 – Частоты собственных колебаний лопаток без наплавки

№ формы колебаний	Без наплавки	С наплавкой
	Частота, Гц	
1	356,56	356,19
2	1217,4	1211,2
3	1439,2	1431,3

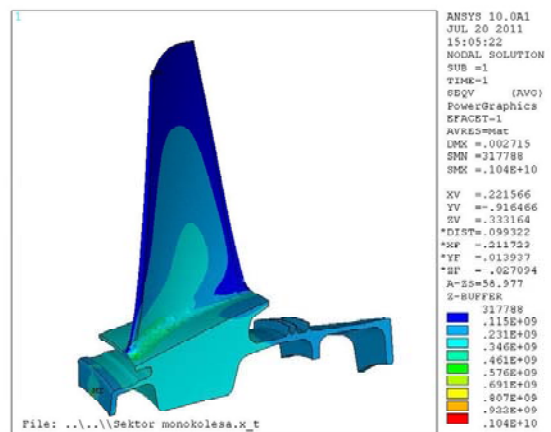


Рис. 5. Нагружение центробежными силами. Поле эквивалентных напряжений (по Мизису), Па

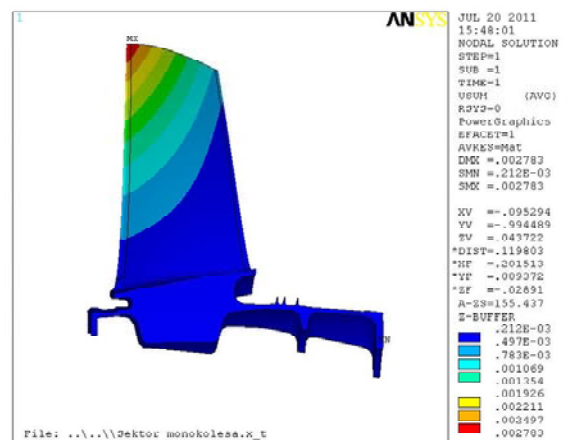


Рис. 6. Нагружение центробежными силами. Поле суммарных перемещений

Частоты собственных колебаний лопаток с наплавкой приведены в табл. 1. Как показал анализ характера распределения полей напряжений и перемещений, наплавка с применением опытных присадочных материалов не меняет характер распределения полей напряжений для всех вариантов нагрузок. Интенсивность напряжений меняется в пределах 10 %.

Определение зон возможного ремонта можно проводить исходя из изменения характера распределения коэффициентов запаса прочности (КЗП). Поля распределения КЗП наплавленного пера лопатки моноколеса при использовании присадок стандартного и опытного

составов приведены на рис. 7–8. Анализ результатов моделирования позволили установить, что использование опытного сплава № 1 с СМК структурой за счет более высоких прочностных характеристик обеспечивает существенное расширение зон возможного ремонта пера лопаток вентилятора.

На основании того, что толщина пера лопаток моноколеса во всех сечениях не позволяет выполнять наплавку дифференцированно на спинке и корыте, принято, что зоны допустимого ремонта могут быть определены путем наложения полей КЗП для спинки и корыта (рис. 9).

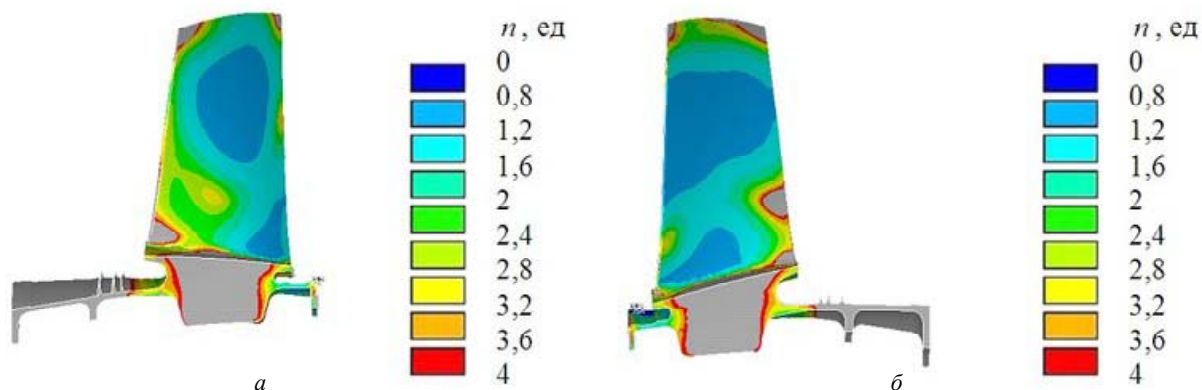


Рис. 7. Поля распределения КЗП для лопатки моноколеса Д27, восстановленной с использованием стандартного присадочного материала: *а* – спинка; *б* – корыто

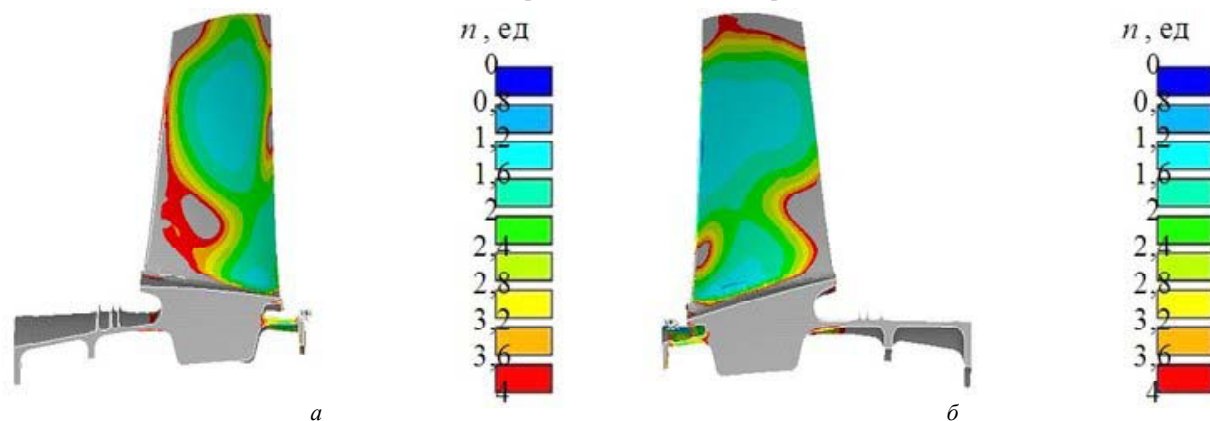


Рис. 8. Поля распределения КЗП для лопатки моноколеса Д27, восстановленной с использованием присадки №1 СМК: *а* – спинка; *б* – корыто

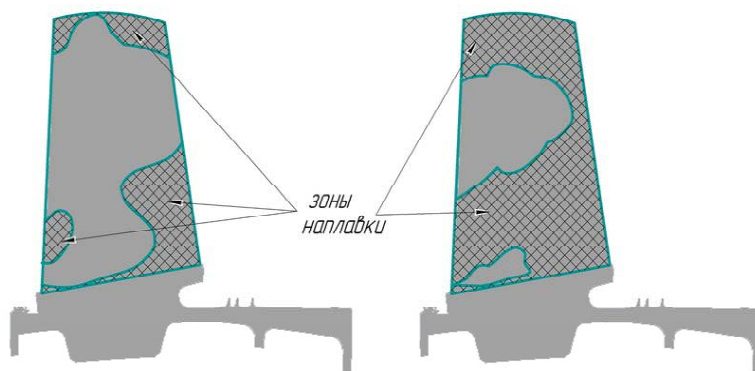


Рис. 9. Зоны допустимого восстановления пера лопатки из сплава ВТ8 моноколеса двигателя Д-27: *а* – при использовании стандартной присадки; *б* – при использовании опытной присадки №1 СМК

Основываясь на полученных результатах моделирования НДС и полей запасов прочности сделан вывод, что при использовании дифференцированного подхода, в основе которого лежит применение модифицированных СМК присадочных материалов, зоны возможного ремонта пера лопаток моноколеса могут быть существенно расширены, в сравнении с наплавкой стандартными присадками. Анализ полученных результатов позволил установить, что применение СМК присадки для ремонта пера лопаток моноколеса, при воздействии переменных нагрузок дает возможность увеличения зон ремонта на 20...25 % (по площади) по сравнению с ранее применяемыми присадочными материалами.

Анализ напряженного состояния моноколеса в области ступицы показал, что в ней преобладают статические напряжения от центробежных сил. В свою очередь, к материалам дисков газотурбинных двигателей предъявляются требования, регламентирующие их способность сопротивляться развитию трещин. В связи с этим при ремонте ступицы моноколеса необходимо использовать присадочный материал, обеспечивающий высокие прочностные свойства при статических нагрузках, а также обладающим высокими характеристиками трещиностойкости, оцениваемыми ударной вязкостью. Анализируя напряженно-деформированное состояние ступичной части моноколеса, а также прочностные свойства сварных соединений полученных АДС с присадочным материалом состава № 2 с СМК структурой, установлено, что практически во всей области диска можно проводить ремонт методом АДС. В свою очередь, серийные присадочные материалы не обеспечивали необходимый уровень ударной вязкости.

Таким образом, для восстановления работоспособности моноколеса необходимо применять различные составы присадочных материалов. Выбор состава присадочного материала базируется на определении области ремонта и действующих на него нагрузок определяющих НДС зоны ремонта.

Установленные области являются расчетными и могут применяться с учетом ряда допущений, а также с дальнейшим уточнением конкретных значений напряжений в рассматриваемых местах ремонта путем проведения натурных испытаний. Кроме того, необходимо учитывать влияние последующей механической, термической и механической обработки моноколеса после восстановления.

Выводы

1. Предложен дифференцированный подход к оценке запаса прочности осевых моноколес ГТД, на основе которого при их ремонте формируют заданный тип структуры в наплавленных зонах, обеспечивающий избирательное повышение уровня механических свойств.

2. Оценка зон возможного ремонта показала, что применение СМК присадки для ремонта пера лопаток моноколеса, при воздействии переменных нагрузок дает

возможность увеличения зон ремонта на 20...25 % (по площади) по сравнению с ранее применяемыми присадочными материалами.

3. Применение предложенного подхода позволяет определять необходимый состав присадочных материалов для различных зон возможного ремонта.

Список литературы

1. Авиационные материалы. Справочник. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы / под ред. Р. Е. Шалина. – М. : ВИАМ, 1989. – Т. 3, Ч.1. – 565 с.
2. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
3. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева – М. : Машиностроение, 1997. – 410 с.
4. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД: Лопатки компрессора и вентилятора / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д., Качан А. Я. и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
5. Овчинников А. В. Применение титановых сплавов с СМК структурой для восстановления деталей роторной части ГТД / Овчинников А. В. // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2(706). – С. 21–25.
6. Овчинников А. В. Формирование структуры в сварных швах жаропрочных титановых сплавов путем их модифицирования / Овчинников А. В. // Стародубовские чтения 2012. Строительство, материаловедение, машиностроение – Вып. 64. “Днепропетровск, ПГАСА, 2012. – С. 359–366.
7. Технологические аспекты повреждений лопаток центробежного колеса компрессора // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении / [Яценко В. К., Павленко Д. В., Рубель О. В. и др.]. – 2000. – № 1. – С. 76–79.
8. Гончар Н. В. Оценка напряженно-деформированного состояния межпазовых выступов диска компрессора с пазами типа «ласточкин хвост» / Гончар Н. В., Павленко Д. В. // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2004. – Вып. 8(16). – С. 77–80.
9. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с.
10. Анализ НДС авиационных конструкций с помощью системы ANSYS / [А. Г. Гребеняков, С. П. Светличный, В. Н. Король, В. Н. Анпилов]. – Харьков : ХАИ, 2002. – 289 с.
11. Конюхов А. В. Основы анализа конструкций в системе ANSYS / Конюхов А. В. – Казань, 2001. – 101 с.
12. Овчинников О. В. Матеріалознавчі основи відновлення виробів із складнолегованих титанових сплавів модифікованими субмікросталічними матеріалами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / О. В. Овчинников. – Запоріжжя, 2013. – 35 с.
13. Пат. 65927 Україна, МПК (2011.01) B23K 9/00. Спосіб аргоно-дугового зварювання титану та його сплавів / Овчинников О. В., Бейгельзімер Я. Ю., Дрозденко Г. В. та інш. ; заявл. та патентовласник Овчинников О.В. – заявл. 03.03.11 ; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24.

Одержано 02.07.2014

Овчинников О.В. Оцінка ремонтпридатності титанових моноколів авіадвигунів

Показано методику оцінки запасів міцності осьового моноколеса авіадвигуна, що дозволяє реалізувати матеріалознавчий підхід до формування заданого типу структури в зонах, відновлених наплавленням, що надає можливість диференційованого збільшення рівня механічних властивостей для підвищення ремонтпридатності деталі в цілому.

Ключові слова: моноколесо, запас міцності, наплавлення, відновлення, титановий сплав, субмікрокристалічна структура.

Ovchinnikov A. Maintainability estimation of aircraft engine titanium blisks

Estimation principle of aircraft engine axial blisk strength margin is revealed. It allows to realize material science approach in formation of defined structure type in areas, that are restored by facing. In turn this enables differentiated rising of mechanical properties for component maintainability increasing as a whole.

Key words: blisk, strength margin, facing, restoration, titanium alloy, submicrocrystalline structure.
