

УДК 621.723.92

Овчинников А.В.¹, Павленко Д.В.¹, Качан А.Я.¹, Шевченко В.Г.¹, Петрик И.А.²¹ Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье² АО «Мотор Сич». Украина, г. Запорожье

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ СВАРКИ

На примере лопатки вентилятора газотурбинного двигателя показана методика оценки запасов прочности пера, позволяющая реализовать материаловедческий подход к формированию заданного типа структуры в зонах, восстановленных наплавкой, что дает возможность дифференцированно-го увеличения уровня механических свойств для повышения ремонтпригодности детали в целом.

Ключевые слова: лопатка вентилятора, запас прочности, наплавка, восстановление, титановый сплав, субмикроскопическая структура, предел прочности, предел выносливости, метод конечных элементов.

Введение

Увеличение ресурса и повышение надежности газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из важнейших задач развития авиационной техники. В ГТД последних поколений, как зарубежного, так и отечественного производства, широко применяются жаропрочные титановые сплавы [1, 2, 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]. В связи с этим, экономическая эффективность применения деталей из титановых сплавов в первую очередь определяется сроком их службы, непосредственно связанным с возможностью их восстановления в процессе ремонта [4].

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 с 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 показывает, что при эксплуатации в различных зонах одной и той же детали возникают разные по характеру и интенсивности напряжения [7, 8, 9]. В связи с этим

для обеспечения работоспособности детали в целом необходимо обеспечить заданный 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.

В процессе работы двигателя рабочие лопатки вентилятора и компрессора подвергаются широкому спектру нагрузок, включая статические и периодические нагрузки. Для основных деталей ГТД уровень свойств и запасов прочности регламентирован нормативной документацией. В тоже время, для определения их ремонтпригодности 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). 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 методов 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. Механические и 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 свойств материала.

Целью настоящей работы являлась разработка методики оценки запасов прочности деталей ГТД из титановых сплавов с измененными свойствами в области наплавленного слоя, полученного с применением стандартных и опытных присадок, для определения зон возможного ремонта на примере лопаток вентилятора.

Объектом исследования являлись рабочие лопатки вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя Д-36. Материал лопаток – $\alpha+\beta$ – титановый сплав ВТЗ-1.

Методы исследования

Предлагаемый дифференцированный подход при определении и обеспечении запасов прочности лопаток ГТД, восстановленных наплавкой, основан на анализе поля напряжений от статических и переменных нагрузок. При этом учитываются следующие предпосылки:

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

Для оценки НДС пера лопаток выполняли прочностной и модальный анализ методом конечных элементов в универсальной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Твёрдотельную модель лопатки создавали в UNIGRAFICS NX. В пере и хвостовике лопатки вентилятора выполняли построение комбинированной конечно-элементной сетки, состоящей из 10-узловых тетраэдров и 20-узловых гексаэдров. Использовали трехмерные тетраэдральные прочностные конечные элементы SOLID 186. Для предварительного разбиения плоскостей использовали 8-ми узловые конечные элементы SHELL 281.

Результаты исследований

Результаты построения конечно-элементной модели лопатки вентилятора на рис. 1.

Учитывая, что при модальном анализе определяемые перемещения и напряжения отображаются в относительных величинах, для определения их абсолютных значений выполняли экспериментальное исследование НДС надплочной части пера лопатки на вибрационном стенде ВЭДС-1000. Предваритель-

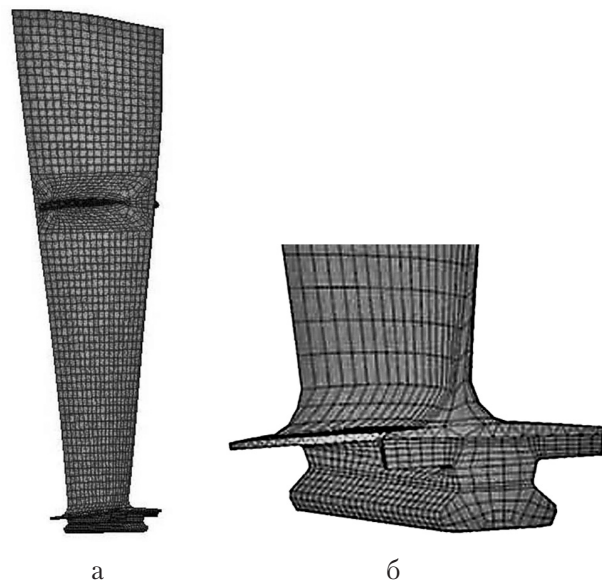


Рис. 1. Конечно элементная модель пера (а) и хвостовика (б) рабочей лопатки вентилятора Д-36

ная вибродиагностика двигателя Д-36 показала, что колебание рабочих лопаток вентилятора происходит преимущественно по четверной форме, что, вероятно, связано с наличием в спектре возмущающих сил, близких по частоте к четвертой собственной частоте лопаток вентилятора. Перо лопатки предварительно препарировали тензодатчиками с базой 3 мм. Датчики наклеивали в места преимущественного разрушения лопаток в эксплуатации, соответствующими узлам колебаний по четвертой форме.

Результаты расчетного распределения относительных эквивалентных напряжений надплочной части лопатки вентилятора при колебаниях по 4-й форме (рис. 2) и экспериментальных значений

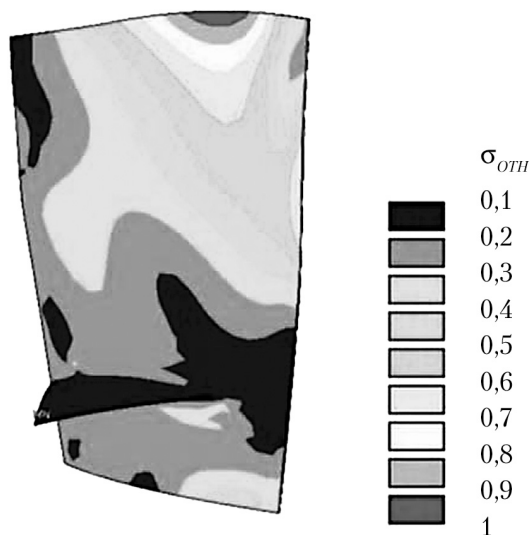


Рис. 2. Поле относительных напряжений в надплочной части пера лопатки вентилятора при колебаниях по четвертой собственной форме

напряжений в надположной части лопатки показали хорошее соответствие. Экспериментально определенное максимальное действующее напряжение при амплитуде колебаний торцевой поверхности пера лопатки 7,4 мм составляет 285 МПа. Учитывая, что деформация пера лопаток при колебаниях по высоким формам реализуется в упруго-пластической области, абсолютное значение напряжений, определяемых расчетным методом при заданной амплитуде колебаний, может быть определено через коэффициент приведения:

$$\theta = \frac{\sigma_{\max}^{\cdot}}{\sigma_{\max}^{\prime\prime}}, \quad (1)$$

где σ_{\max}^{\cdot} — экспериментальное значение максимальных напряжений, $\sigma_{\max}^{\prime\prime}$ — расчетное значение максимальных напряжений.

Для колебаний лопаток вентилятора с амплитудой $2A=7,4$ мм коэффициент приведения напряжений составил $\theta=2,3$. В результате исследования собственных форм колебания лопаток выявляются точки, в которых при резонансных колебаниях по той или иной собственной форме возникают наибольшие напряжения.

При определении свойств материала лопатки при наплавке исходили из следующего. Существующие подходы к определению запаса прочности деталей базируются на использовании нижнего значения допуска для предельных напряжений (в пределах рассеяния) для материала и максимальной величины действующих напряжений. Предлагаемый подход основан на расчете запаса прочности дифференцированно для различных зон пера лопатки. Расчет запаса прочности включает действующие в детали величины переменных и постоянных напряжений с учетом свойств материала. При этом учитывали, что величины предельных напряжений материала наплавленного слоя изменяются в зависимости от состава присадочного материала. Так, при использовании для наплавки присадочного материала в обычном, крупнокристаллическом состоянии, предел выносливости лопаток составлял 0,7...0,75 от величины предела выносливости основного материала лопатки при симметричном цикле нагружения. При использовании для наплавки пера лопаток присадочного материала в субмикроструктурном состоянии экспериментально установлено, что допускаемая величина переменных напряжений в наплавленной зоне может достигать 0,85...0,9 от величины предела выносливости основного материала лопатки при симметричном цикле нагружения [5].

Для достижения поставленной цели предложен новый подход к определению коэффициентов запаса прочности. Данный подход заключается в сравнении величины напряжений, возникающих в результате

действия внешних нагрузок в детали из исходного материала, с напряжениями в восстановленной детали, значения которых получены экспериментальным путем. Значения прочностных свойств наплавленного слоя, в нашем случае, равны соответствующим свойствам сварных соединений титановых сплавов. Их экспериментальное определение проводили на сварных образцах, полученных аргоно-дуговой сваркой с использованием стандартных и опытных субмикроструктурных присадочных материалов. Принимали, что зонами, возможными для ремонта, могут быть участки пера лопатки, где расчетные значения коэффициентов запаса прочности больше допустимых нормативных значений. Участки пера лопаток, в которых расчетное значение коэффициента запаса прочности меньше нормативного значения не могут быть восстановлены наплавкой.

Для рабочих лопаток ГТД значение коэффициентов запаса прочности можно определять по переменным напряжениям, используя зависимость [12]:

$$n_a = \frac{\sigma_{-1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)}{K_{\sigma}^* \cdot \sigma_a}, \quad (2)$$

где σ_{-1} — экспериментальное значение предела выносливости образцов при симметричном цикле нагружения, МПа;

σ_a — амплитуда действующих переменных напряжений в расчетной точке пера лопатки, МПа.

σ_m — постоянные напряжения, действующие в расчетной точке пера лопатки, МПа;

σ_a^{\cdot} — экспериментальное значение предела прочности материала наплавки, МПа

K_{σ}^* — обобщенный эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Зависимость (2) позволяет оценить коэффициент запаса прочности с учетом экспериментальных значений механических свойств наплавленного слоя. Принимая во внимание существенное увеличение уровня механических свойств сварных (наплавленных) соединений, полученных при использовании экспериментальных присадочных материалов, в сравнении с стандартными присадками, можно ожидать расширения зон возможного ремонта.

Расчет напряженно-деформированного состояния пера лопатки вентилятора выполняли для условий работы двигателя на земле. Рассчитывали действия статических нагрузок для максимальной частоты вращения ротора вентилятора — 5300 об/мин. Конечно-элементная модель при определении поля напряжений от действия периодических сил аналогична модели, используемой для оценки НДС от статических нагрузок.

Расчет поля запасов прочности выполняли для лопатки без наплавки, а также с наплавкой с исполь-

Исходные данные для расчета запаса прочности лопаток вентилятора

Параметр	Значение, МПа
предел выносливости сварных образцов с опытной присадкой СМК	462
предел выносливости сварных образцов со стандартной присадкой ВТ-2	270
предел выносливости образцов из сплава ВТЗ-1	490
предел выносливости натуральных лопаток вентилятора	285
предел прочности сварных образцов со стандартной присадкой ВТ-2	915
предел прочности сварных образцов с опытной присадкой СМК	997
предел прочности сплава ВТЗ-1	1090

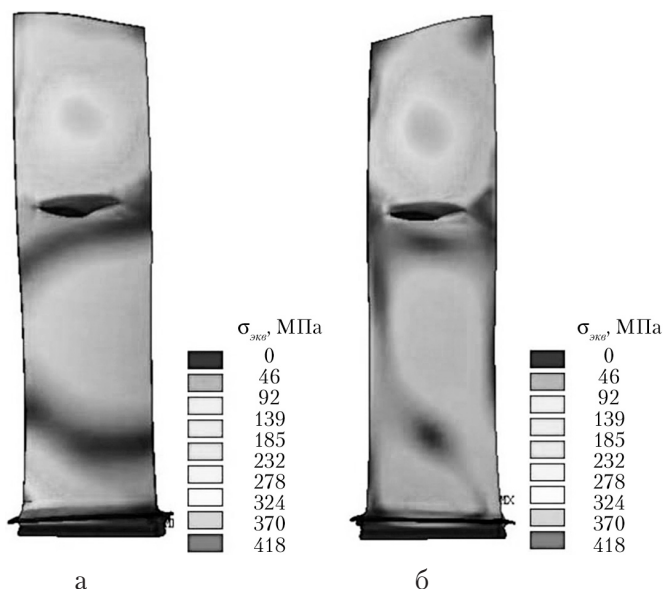


Рис. 3. Поля напряжений в пере лопатки вентилятора при колебаниях по 4-й форме

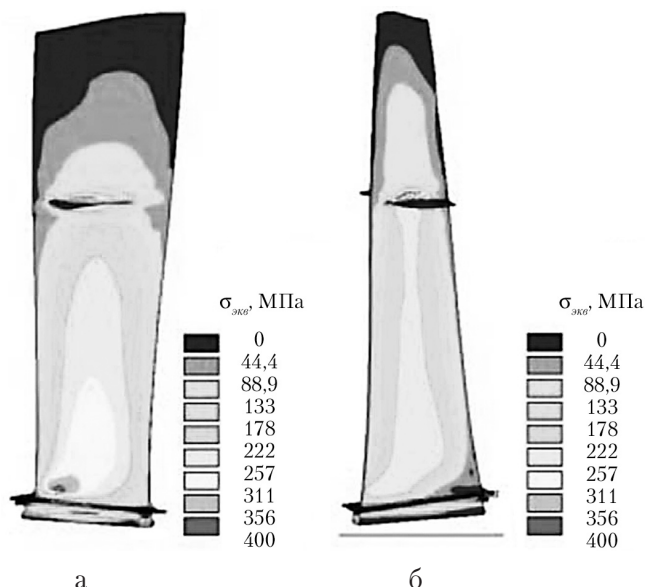


Рис. 4. Поля напряжений для корыта (а) и спинки (б) пера лопатки от действия статических нагрузок

зованием присадочного материала в стандартном, крупнокристаллическом и опытном, субмикроструктурном состоянии [5]. Для расчета использовали исходные данные, полученные в результате предварительно проведенных исследований (табл. 1).

Обобщенный эффективный коэффициент концентрации напряжений составлял 2,13. При расчете использовали средние значения прочностных характеристик. Их рассеяние в пределах допуска, а также возможные вариации действующих напряжений в процессе эксплуатации двигателя не учитывали. Принятые допущения учитывали при выборе предельно допустимого значения запаса прочности.

На рис. 3 показаны поля напряжений при колебании пера лопатки по 4-й форме

На рис. 4 показаны поля напряжений для корыта (а) и спинки (б) пера лопатки от действия статических нагрузок.

Для оценки адекватности предлагаемого подхода к определению запаса прочности и методик расчета НДС, выполняли расчет запаса прочности серийной лопатки вентилятора из основного материала (без наплавки). Анализ полей запасов прочности для серийной лопатки показал, что расчетные значения хорошо согласуются с результатами, полученными на основании экспериментальных исследований. Запасы прочности во все точки пера лопатки соответствовали нормативным значениям, что подтверждает адекватность предлагаемой расчетной методики.

Результаты моделирования показывают, что использование экспериментальной СМК присадки за счет более высоких прочностных характеристик позволяет существенно расширить зоны возможного ремонта пера лопаток вентилятора тем самым, повысив ее ремонтпригодность (рис. 5, 6),

Полученные в работе [6] результаты показали возможность существенного повышения уровня механических свойств сварных соединений. В тоже время, повысить одновременно прочность сварных соединений при статических и динамиче-

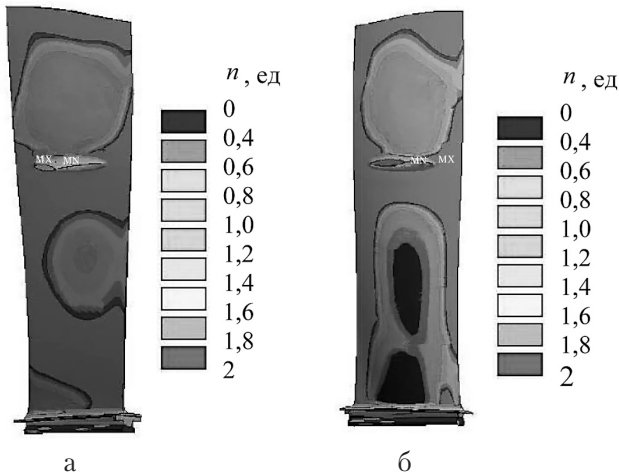


Рис. 5. Поля распределения запасов прочности для пера лопатки вентилятора Д-36, восстановленной с использованием присадки ВТ-2: а – спинка; б – корыто

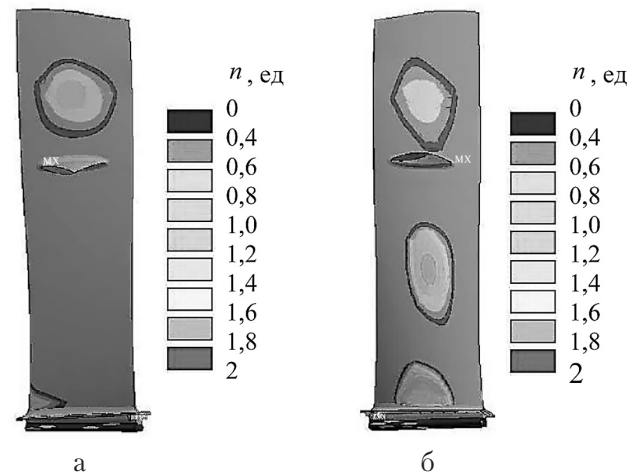


Рис. 6. Поля распределения запасов прочности для пера лопатки вентилятора Д-36, восстановленной с использованием экспериментальной СМК присадки: а – спинка; б – корыто

ских нагрузках путем применения опытных составов присадочных материалов не представляется возможным.

Полученные результаты моделирования НДС и полей запасов прочности показывают (рис. 5, 6), что с применением дифференцированного подхода и с использованием зоны возможного ремонта пера лопаток, модифицированных СМК присадочных материалов, существенно расширяется в сравнении с наплавкой стандартными присадками.

Учитывая, что толщина пера лопаток во всех полученных сечениях не позволяет выполнять наплавку дифференцированно на спинке и корыте, зоны допустимой наплавки могут быть определены путем наложения зон допустимых для наплавки соответственно спинки и корыта (рис. 7).

В качестве предельной величины запаса прочности принят интегрированный показатель, учитывающий величину регламентируемых коэффициентов запаса прочности для исследуемой лопатки при статических и периодических нагрузках принятый для исследуемой лопатки 1,4 [14].

Анализ расчетных зон возможного ремонта пера наплавкой в зависимости от используемого присадочного материала показывает, что использование экспериментальной СМК присадки позволяет расширить площадь зон возможного ремонта в 2,2...2,5 раза по сравнению с использованием стандартной присадки ВТ-2 (рис. 7).

Выводы

Таким образом, анализ зон возможного ремонта пера лопатки вентилятора, с использованием предложенного дифференцированного подхода показал, что применение опытной присадки в субмикросталлическом состоянии позволяет существенно их расширить. Дальнейшее расширения зон ремонта

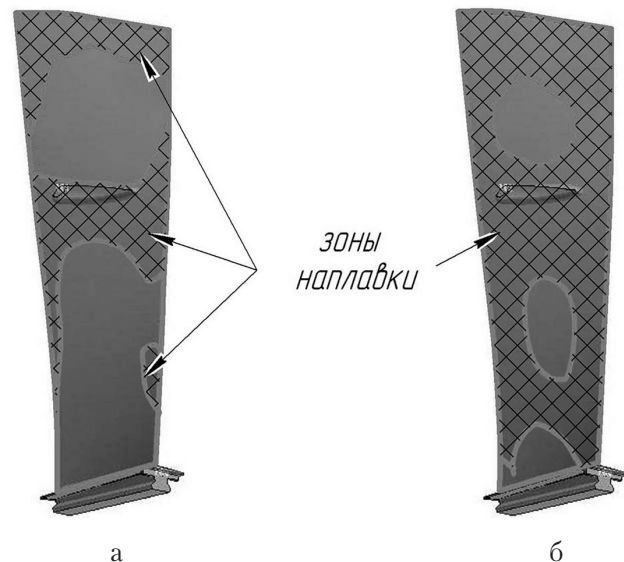


Рис. 7. Зоны возможного восстановления пера лопатки вентилятора наплавкой: а – при использовании стандартной присадки ВТ-2; б – при использовании опытной присадки СМК

возможно за счет дифференцированного применения присадок имеющих высокие значения прочности при статических и переменных нагрузках. Предложенный подход может быть реализован для широкого спектра деталей газотурбинных двигателей таки, например, как лопатки моноколес.

Литература

- [1] Авиационные материалы. Справочник. Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. / Под. ред. Р.Е. Шалина. – М.: ВИАМ, 1989. – Т.3, Ч.1. – 565 с.
- [2] Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД – Запорожье, изд. 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 // Автоматическая сварка — 2012. — №2(706). — С.21-25.
- [6] Овчинников А.В. Формирование структуры в сварных швах жаропрочных титановых сплавов путем их модифицирования. // Стародубовские чтения 2012. Строительство, материаловедение, машиностроение — Вып 64. — Днепропетровск, ПГАСА, 2012. — С. 359-366.
- [7] Яценко В.К., Павленко Д.В., Рубель О.В., Зиличхис С.Д., Орлов М.Р., Кондратюк Э.В. Технологические аспекты повреждений лопаток центробежного колеса компрессора // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. — 2000. — №1. — С. 76-79.
- [8] Гончар Н.В., Павленко Д.В. Оценка напряженно-деформированного состояния межпазовых выступов диска компрессора с пазами типа «ласточкин хвост» // 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] А.Г. Гребеняков, С.П. Светличный, В.Н. Король, В.Н. Анпилов Анализ НДС авиационных конструкций с помощью системы ANSYS. Харьков: ХАИ, 2002. — 289 с.
- [11] Конохов А.В. Основы анализа конструкций в системе ANSYS. Казань, 2001. — 101 с.
- [12] Петрик И.А., Овчинников А.В., Басов Ю.Ф., Шевченко В.Г., Рягин С.Л., Селиверстов А.Г. Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя // Вестник двигателестроения. — №4. — 2006 — С. 104-108.
- [13] Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов М. «Наука», 1986. — 560 с.
- [14] ОСТ 1 00304-79 Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждений лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов — 15 с.

Ovchinnikov A.V.¹, Pavlenko D.V.¹, Kachan A.Y.¹, Shevchenko V.G.¹, Petrik I.A.²

¹ Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhye

² Motor Sich JSC. Ukraine, Zaporozhye

DIFFERENTIATED APPROACH TO THE ASSESSMENT OF SAFETY MARGIN PARTS OF GAS TURBINE ENGINES REHABILITATION WELDING METHODS

On the example of a gas turbine engine fan blades the technique of estimating reserves of strength of the pen, which allows to create material approach to the formation of a given type of structure in the areas of reduced-faced, allowing differentiated increase in the level of mechanical properties to improve the maintainability date parts in general.

Keywords: fan blades, safety factor, surfacing, rehabilitation, titanium alloys, submicroscopic structure, strength, endurance limit, finite element method.

References

- [1] Aviacionnye materialy. Spravochnik. Deformiruemye zharoprochnye stali i splavy. / Pod. red. R.E. Shalina. — М.: VIAM, 1989. — Т.3, Ch.1. — 565 с.
- [2] Boguslaev V.A., Jacenko V.K., Zhemanjuk P.D., Puhalskaja G.V., Pavlenko D.V., Ben' V.P. Otdelchno-uprochnjajushhaja obrabotka detalej GTD — Zaporozh'e, izd. JSC «Motor Sich», 2005. — 559 с.
- [3] Sovremennye tehnologii v proizvodstve gazoturbinnih dvigatelej / Pod red. A.G. Bratuhina, G.K. Jazova, B.E. Karaseva — М.: Mashinostroenie, 1997. — 410 с.

- [4] Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej GTD: Lopatki kompressora i ventiljatora / [Boguslaev V.A., Muravchenko F.M., Zhemanjuk P.D., Ka-chan A.Ja. i dr.]. — Zaporozh'e : OAO «Motor Sich», 2003. — 396 s.
- [5] Ovchinnikov A.V. Primenenie titanovyh splavov s SMK strukturoj dlja vossta-novlenija detalej rotornoj chasti GTD // Avtomaticheskaja svarka — 2012. — №2(706). — S.21-25.
- [6] Ovchinnikov A.V. Formirovanie struktury v svarnyh shvah zharoprochnyh tita-novyh splavov putem ih modifitsirovani-ja. // Starodubovskie chtenija 2012. Stroitel'stvo, ma-terialovedenie, mashinostroenie — Vyp 64. — Dnepropetrovsk, PGASA, 2012. — S.359-366.
- [7] Jacenko V.K., Pavlenko D.V., Rubel' O.V., Zilichihis S.D., Orlov M.R., Kondra-tjuk Je.V Tehnologicheskie aspekty povrezhdenij lopatok centrobezhnogo kola kompressora // Novye materialy i tehnologii v metalurgii i mashinostroenii. — 2000. — №1. — S.76-79.
- [8] Gonchar N.V., Pavlenko D.V. Ocenka naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija mezhfazovyh vystupov diska kompressora s pazami tipa "lastochkin hvost" // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. — Har'kov, 2004. — Vyp. 8(16). — S. 77-80.
- [9] Petuhov A.N. Soprotivlenie ustalosti detalej GTD. — M.: Mashinostroenie, 1993. — 240 s.
- [10] A.G. Grebenjakov, SP. Svetlichnyj, V.N. Korol', V.N. Anpilov Analiz NDS aviacionnyh konstrukcij s pomoshh'ju sistemy ANSYS. Har'kov: HAI, 2002. — 289 s.
- [11] Konjuhov A.V. Osnovy analiza konstrukcij v sisteme ANSYS. Kazan', 2001. — 101 s.
- [12] Petrik I.A., Ovchinnikov A.V., Basov Ju.F., Shevchenko V.G., Rjagin S.L., Seliverstov A.G. Povyshenie rabotosposobnos-ti lopatok iz titanovyh splavov ventiljatora aviadvigatelja // Vestnik dvigatelestroenija. — №4. — 2006 — S.104-108.
- [13] Birger I.A., Mavljutov R.R. Soprotivlenie materialov M. "Nauka", 1986. — 560 s.
- [14] OST 1 00304-79 Lopatki gazoturbinnih dvigatelej. Normirovanie povrezhdenij lopatok kompressorov ot popadanija pos-toronnih predmetov — 15 s.