

УДК 621.78

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

Увеличение срока эксплуатации элементов конструкции авиационной техники с использованием упрочняющих технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков

Д.А. Иванов¹, Т.В. Петрова¹

*¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: Дальнейшее совершенствование методологии восстановительного ремонта авиационной техники возможно только при условии широкого использования современных бездеформационных технологий увеличения и восстановления ресурса элементов их конструкции, например, таких как обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками – газоимпульсная обработка. В данной статье представлены результаты разработки методологии использования технологий повышения жизненного ресурса подверженных усталостному разрушению элементов авиационного двигателя и системы шасси, оказывающих существенное влияние на безопасность полетов, путем использования перспективной технологии повышения надежности деталей на основе обработки нестационарными дозвуковыми воздушными потоками, результаты разработки методов, направленных на повышение эффективности и безопасности авиаперевозок за счет повышения надежности и увеличения срока эксплуатации элементов конструкции авиационных транспортных средств, оборудования и механизмов, оптимизации сроков проверок и ремонтов с использованием технологии повышения и восстановления ресурса путем обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками. Результаты исследований, направленных на оптимизацию восстановительного ремонта воздушных судов за счет использования газоимпульсной обработки элементов их конструкции, а также алгоритмы обработки трещины элемента конструкции воздушного судна с целью воспрепятствования ее дальнейшему распространению, восстановления механических свойств элемента конструкции ВС, снизившихся в результате воздействия нестационарных воздушных потоков в ходе эксплуатации и обработки областей с повышенной плотностью дислокаций с целью предотвращения образования трещин. Результаты разработки методологии использования бездеформационных упрочняющих технологий, в частности на основе пульсирующих дозвуковых воздушных потоков (газоимпульсная обработка), в процессе восстановительного ремонта воздушных судов и оптимизации диагностирования авиационной техники с учетом влияния сред, в том числе нестационарных воздушных потоков, на свойства материала элементов конструкции.

Ключевые слова: воздушный транспорт, ресурс, бездеформационная обработка.

Для цитирования: Иванов Д.А., Петрова Т.В. Увеличение срока эксплуатации элементов конструкции авиационной техники с использованием упрочняющих технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 41–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

Increasing the service life of structural elements of aviation equipment using strengthening technologies based on pulsating subsonic gas flows

D.A. Ivanov¹, T.V. Petrova¹

¹Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia

Abstract: Further improvement of the methodology of maintenance and repair of aviation equipment is possible only if modern non-deformational technologies are widely used to increase and restore the durability of their structural elements, for example, such as processing with pulsating subsonic air flows – gas pulse processing. This article presents the results of the methodology development for using the technologies to increase the durability of the aircraft engine and landing gear system components subject to fatigue destruction, having a significant impact on flight safety, by using a promising technology to enhance the reliability of the parts based on processing by non-stationary subsonic air flows, the results of the development of methods, aimed at improving the efficiency and safety of air transportation by increasing the reliability and service life of structural elements of aircraft, equipment

and mechanisms, optimizing the timing of inspections and repairs using the technology to increase and restore the durability by processing with pulsating subsonic gas flows. The results of the research aimed at optimizing the maintenance and repair of aircraft through the use of gas-pulse processing of their structural elements, as well as algorithms for processing cracks in the aircraft structural element in order to prevent its further spread, restoring the mechanical properties of the aircraft structural element that decreased as a result of the impact of non-stationary air flows during operation and processing areas with increased location density in order to prevent the formation of cracks. The results of the development of a methodology for the use of non-deformational strengthening technologies, especially based on pulsating subsonic air flows (gas pulse treatment) in the process of aircraft maintenance and optimization of diagnostics of aviation equipment, considering the influence of media, including non-stationary air flows on the material properties of structural elements.

Key words: air transport, durability, non-deformational processing.

For citation: Ivanov, D.A. & Petrova, T.V. (2022). Increasing the service life of structural elements of aviation equipment using strengthening technologies based on pulsating subsonic gas flows. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 2, pp. 41–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

Введение

Дальнейшее совершенствование методологии восстановительного ремонта авиационной техники возможно только при условии широкого использования современных бездеформационных технологий увеличения и восстановления ресурса элементов их конструкции, например, таких как обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками – газоимпульсная обработка [1]. Многие конструктивные элементы двигателя и шасси склонны к усталостному разрушению из-за мало- и многоцикловых нагрузок.

Естественно, что для повышения жизненного ресурса элементов двигателя и шасси необходимо увеличить время до зарождения трещин и замедлить их распространение.

Существующая методология ремонта авиационной техники представляет собой совокупность методов, позволяющих приостанавливать и тормозить рост трещин. Как правило, это трудоемкие и недешевые операции, не всегда приводящие к желаемому результату, и зачастую принимается решение заменить изношенную деталь новой.

Предварительный обдув пульсирующим воздушным потоком позволяет локализовать скрытые дефекты материала не только на поверхности, но и по всему объему элементов конструкции воздушного судна и затормозить развитие микротрещины, что задержит образование макротрещин.

Постановка задачи

Основная задача ремонта воздушного судна может быть охарактеризована как поддержание надежности его узлов [2–15].

Для обеспечения восстановления первоначальных механических и эксплуатационных свойств отремонтированных элементов конструкции воздушного судна и авиационного двигателя, а в ряде случаев и их повышения, методологически является перспективным использование современных бездеформационных технологий повышения конструктивной прочности, таких как ультразвуковое упрочнение, магнитно-импульсная упрочняющая обработка, упрочнение с применением импульсных плазменных и электронных пучков, ударно-волновое и термическое лазерное упрочнение, виброобработка. Рассмотрим методологию их использования на примере газоимпульсной обработки, отличающейся от упомянутых выше технологий как комбинированным характером воздействия газовых импульсов и звукового давления, так и техническим результатом комплексного повышения механических и эксплуатационных свойств.

Решение задачи

При появлении в конструктивном элементе воздушного судна трещины возникает задача управления последующим ее ростом [16] таким образом, чтобы за известный интервал

времени эксплуатационного нагружения увеличение размера трещины происходило в пределах ее стабильного развития.

Такого эффекта можно достичь воздействием на трещину нестационарного звукового потока воздуха, пульсирующего с определенной частотой и натекающего на обрабатываемое изделие с определенной средней скоростью в течение малого промежутка времени (5–15 мин).

На рис. 1 представлен результат обдува изделий из легированных сталей с использованием малошумного (не более 40 дБ) генератора пульсирующих газовых потоков на основе вентилятора осевого типа (рис. 2).

Частота колебаний параметров газового потока составляла 500 Гц. Обдув осуществлялся перпендикулярно плоскости изделия. Исследования проводились на образцах для испытания на вязкость разрушения (трещиностойкость) из стали 38ХС в высокопрочном состоянии. Диаметр образцов составлял 50 мм, а толщина – 10 мм.

Результат испытания образцов свидетельствует о существенно меньшем распространении трещины у обдутого образца при той же нагрузке.

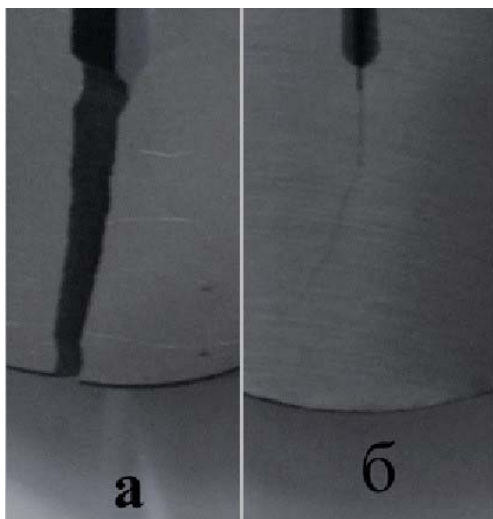


Рис. 1. Распространение трещины в стальном изделии при одинаковой нагрузке: *а* – без обдува; *б* – обдув звуковым пульсирующим воздушным потоком в течение 15 мин

Fig. 1. Crack propagation in a steel product at the same load: *a* – without blowing; *b* – blowing with subsonic pulsating airflow for 15 minutes

Также испытания на вязкость разрушения (ГОСТ 25.506-85) осуществлялись после обработки пульсирующим воздушным потоком в течение 15 минут при частоте колебаний параметров потока 900 Гц и импульсном звуковом давлении 130 дБ. Для испытаний на вязкость разрушения использовались плоские образцы с боковым односторонним надрезом и трещиной для испытаний на растяжение. Обдув во всех случаях выполнялся при расположении образцов поперек потока (плоскостью навстречу потоку).

Использовались образцы из аустенитной стали 5Х10Г15СФ2АЦР после закалки. Среднее значение HRC образцов составляло 39 единиц. Значение коэффициента, характеризующего интенсивность растягивающих напряжений в устье трещины при переходе ее к самопроизвольному росту K_{IC} у образцов, подвергавшихся газоимпульсной обработке, оказалось выше на 30 %, что также свидетельствует о замедлении роста трещин в результате обработки пульсирующими звуковыми газовыми потоками.

Обработка элемента конструкции воздушного судна или авиадвигателя пульсирующим газовым потоком приводит к положительным результатам независимо от вида трещины.

Подобная обработка не влечет за собой видимые внешние изменения, однако в процессе эксплуатации наблюдается положительный эффект. Результаты экспериментов позволили установить режимы обдува (сочетание средней скорости натекания воздуха на поверхность детали, частоты пульсаций и времени обдува) позволяющие получить эффект повышения конструктивной прочности и эксплуатационных свойств для стандартных ударных и разрывных образцов, изготовленных из различных материалов, а также конкретных деталей (болтов, кронштейнов, пружин и др.).

Так как используемые генераторы колебаний параметров газового потока изменяют скорость и частоту, были определены оптимальные временные режимы обдува для разных сочетаний частот и скоростей потока и разных целей [1].



Рис. 2. Генератор на основе осевого вентилятора с конфузоров для увеличения скорости воздушного потока
Fig. 2. A generator based on an axial fan with a confuser to increase the air flow velocity

Для обработки конкретных конструктивных элементов воздушных судов в качестве генератора импульсных потоков воздуха можно использовать осевые вентиляторы, дополненные, в случае необходимости увеличения скорости потока с целью уменьшения времени достижения заданного эффекта, конфузорами. Подобные вентиляторы обладают определенной частотой вращения, производительностью и количеством лопастей. Зная частоту и скорость этого генератора, для получения желаемого результата достаточно задать продолжительность обдува элемента конструкции воздушного судна, определяемую исходя из формы, массы, размеров, материала, вида закрепления, и определить направление обдува в зависимости от приоритета в повышении свойств (приоритет в повышении показателей прочности, приоритет повышения показателей вязкости, их сочетание при меньшем приросте каждого свойства) с обязательным учетом эксплуатационной нагрузки, включая газодинамическое воздействие.

Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники требуют оптимизации. В качестве критерия оптимизации можно использовать следующий:

$$K = 1 - (\sum_{i=1}^m \tau_{oi} + \sum_{i=1}^p \tau_{pi} + \sum_{i=1}^n \tau_{ni}) / \tau.$$

Здесь τ_o , τ_n и τ_n – продолжительность технического обслуживания, плановых и внеплановых ремонтов соответственно в часах; m , p и n – их количество за год; τ – количество часов в году (8760).

Значение критерия K во всех случаях меньше 1, при этом чем оно ближе к 1, тем выше оптимизация.

Обработка пульсирующими звуковыми воздушными потоками конструктивных элементов воздушных судов с целью повышения их ресурса положительно влияет на величину критерия оптимизации технического обслуживания и ремонта.

Результатом нахождения повреждений в ходе осмотров становятся внеплановые ремонты, количество которых, благодаря повышению устойчивости элементов конструкции к деградирующим эксплуатационным факторам путем газоимпульсной обработки, может быть соответственно уменьшено.

В качестве критерия оптимизации продолжительности газоимпульсной обработки было принято повышение механических и эксплуатационных свойств, таких как прочность, пластичность, ударная вязкость, кор-

розионная стойкость, сопротивление усталости, хладостойкость, жаропрочность в комплексе, когда при росте одних характеристик не допускается снижение других ниже первоначальных значений:

$$K_{cvi} \geq 1,$$

где K_{cvi} – значение i -го свойства, достигнутое в результате газоимпульсной обработки, отнесенное к его первоначальному значению.

Так, в ходе технического обслуживания вертолетов проверяют отсутствие деформаций и трещин обшивки, силового набора планера и рамы двигателей, забоин на лопастях несущего и рулевого винтов, других повреждений. При обнаружении подобных дефектов рекомендуется использовать газоимпульсную обработку с целью повышения и восстановления механических свойств в месте повреждения и воспрепятствования его дальнейшему развитию.

Обладая свойством малой (10–30 мин) продолжительности, газоимпульсная обработка может осуществляться как при оперативном ТО, особенно на этапах после загрузки (выгрузки) багажа, так и при очередном ТО по форме 1 и др.

Обобщая предлагаемую методологию использования обработки пульсирующими звуковыми газовыми потоками в процессе технического обслуживания и восстановительного ремонта элементов конструкции воздушных судов, следует отметить, что элементы конструкции воздушного судна можно разделить на две группы исходя из того, обдувается в процессе эксплуатации данный элемент воздушными потоками или не подвержен данному воздействию.

При техническом обслуживании и восстановительном ремонте последних можно не учитывать деградационные процессы, связанные с воздействием колебаний параметров воздушного потока на структуру и свойства материала элемента конструкции. Использование газоимпульсной обработки подобных элементов в процессе технического обслуживания и восстановительного ремонта решит задачу повышения стойкости к усталостному

разрушению, а также устойчивости к динамическим нагрузкам. Направление обработки должно выбираться с учетом эксплуатационных статических и динамических нагрузок. При обнаружении трещины допустимых регламентом размеров или области с повышенной плотностью дислокаций, предшествующей образованию трещины, следует проводить газоимпульсную обработку соответствующей области элемента конструкции в течение расчетной продолжительности, перпендикулярно поверхности элемента конструкции (рис. 3).

В случае если в процессе эксплуатации элемент конструкции воздушного судна испытывает деградационное воздействие натекающих нестационарных воздушных потоков, выражающееся в увеличении плотности дефектов кристаллического строения в поверхностных слоях, устранить его можно газоимпульсной обработкой в направлении, противоположном эксплуатационному воздействию воздушных потоков. В остальном газоимпульсная обработка микротрещин и других дефектов, а также обработка с целью повышения трещиностойкости и устойчивости к динамическим нагрузкам осуществляется аналогично таковой для элементов конструкции воздушного судна, не подвергающихся воздействию воздушных потоков при эксплуатации.

Различают внезапные и постепенные отказы [17]. Первые возникают неожиданно, в короткий промежуток времени и характеризуются хрупким разрушением. Особенность постепенных отказов – накопление за время эксплуатации воздушного судна необратимых повреждений, вызванных усталостью материала, пластическими деформациями, ползучестью, старением или механическим износом.

Каждый агрегат или узел воздушного судна состоит из конструктивных элементов, надежность которых неодинакова. Своевременная бездеформационная обработка, такая как обработка пульсирующими звуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка), практически любого конструктивного элемента позволяет существенно повы-

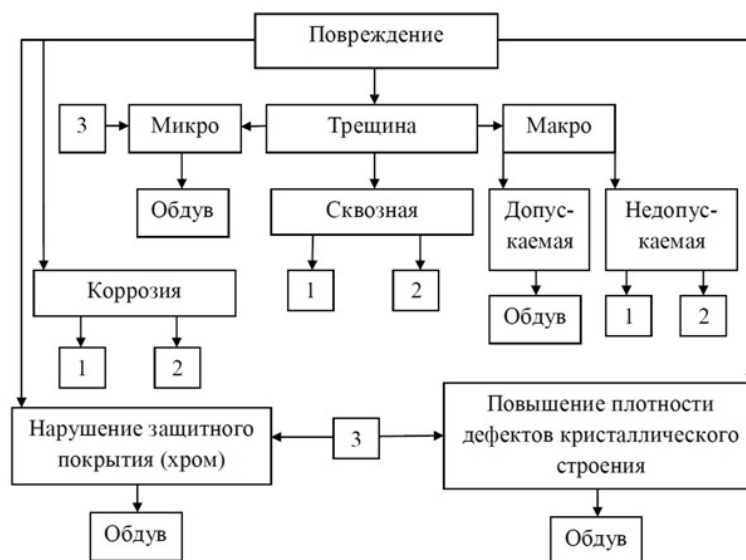


Рис. 3. Использование газоимпульсной обработки (обдув) в процессе технического обслуживания и ремонта: 1 – замена поврежденного конструктивного элемента воздушного судна или аэродромной техники новым обдутым; 2 – ремонт с последующим обдувом, если конструктивный элемент ремонтпригоден; 3 – упреждающий обдув до начала эксплуатации (желателен для всех нагруженных конструктивных элементов)

Fig. 3. The use of gas pulse treatment (blowing) in the process of maintenance and repair: 1 – replacement of a damaged structural element of an aircraft or airfield equipment with a new blown one; 2 – repair followed by blowing, if the structural element is repairable; 3 – anticipatory blowing before operation (desirable for all loaded structural elements)

суть срок его службы (ресурс), а значит, и его надежность [1].

С точки зрения механики конструкций воздушных судов типовыми элементами, образующими агрегаты систем механического оборудования и систем жизнеобеспечения летательных аппаратов являются стержневые элементы, пластины, оболочки и т. п.

Исследование амплитудно-частотных характеристик дозвукового воздушного потока, натекающего на подобные элементы, осуществлялось при помощи программы SpectraPLUS Professional Edition 5.0.

При встрече с обдуваемым элементом конструкции воздушного судна происходит смещение доминирующей частоты в область более низких значений, практически независимо от формы элемента конструкции, при условии его малого размера в сравнении с поперечным сечением натекающего на него потока. В обратном случае наблюдается появление дополнительных амплитудных всплесков, которые могут служить дополнительными рабочими частотами.

В случае близкого расстояния до обдуваемого объекта амплитуда гармоник уменьшается. По мере увеличения расстояния амплитуда доминирующей частоты меняется циклически, с максимумом на расстоянии порядка 30 мм от обдуваемого объекта.

В случае крупного объекта обдува по мере удаления от объекта доминирующая частота смещается в более низкочастотную область. В случае увеличения скорости воздушного потока при прочих равных условиях доминирующая частота потока, натекающего на преграду, смещается в область более высоких частот.

Знание амплитудно-частотной характеристики импульсной струи, натекающей на конструктивный элемент воздушного судна, позволяет установить доминирующие частоты колебаний и таким образом выявить рабочие частоты, при которых наблюдается значительный рост амплитуды колебаний.

Близость собственной частоты колебаний обдуваемого объекта к одной из рабочих частот натекающего на него пульсирующего

газового потока создает резонансный эффект и значительно уменьшает требуемую продолжительность обработки.

На авиаремонтных предприятиях для восстановления изношенных или поврежденных металлических элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей используют операции наплавки, в процессе которых на поврежденном участке образуется слой литого металла. По своим механическим и эксплуатационным свойствам наплавленный участок будет отличаться от остального элемента конструкции, вне зависимости от того, был ли элемент получен обработкой давлением или литьем, упрочнен термически, деформационно или, как в случае литых корпусов насосов и других подобных устройств из силумина, не подвергался иной обработке. В последнем случае наплавленный участок будет отличаться размером и формой зерна, которые в основном и определяют механические свойства литых конструкций. Если элемент конструкции был получен холодным пластическим деформированием в результате использования для его восстановления наплавки или сварки, включая электроконтактную, в зоне термического влияния происходит снятие наклепа и прочностные свойства снижаются. При восстановлении подобных элементов конструкции рихтовкой, наоборот, возникает дополнительный наклеп, приводящий к локальному охрупчиванию и образованию концентраторов напряжений. Практически все операции восстановительного ремонта, связанные с нагревом и (или) восстановлением формы, добавляют в отремонтированный объект остаточные напряжения, которые могут представлять опасность в процессе эксплуатации. Разделим ремонтируемые объекты, элементы конструкции воздушных судов, авиационных двигателей и аэродромной техники на четыре основные группы по используемому виду упрочнения при их изготовлении.

1. Термоупрочняемые детали и элементы конструкции, изготавливаемые механической обработкой (валы двигателей) или горячей обработкой давлением (как лопасти вентиляторов и компрессорные лопатки), включая

полученные термомеханической обработкой или литые с последующим термическим упрочнением (такие как турбинные лопатки).

2. Детали и элементы конструкции, полученные холодной объемной или листовой штамповкой и упрочненные деформационно.

3. Литые нетермоупрочняемые элементы конструкции.

4. Детали, окончательные свойства которых формируются химико-термической обработкой.

Рассмотрим пути совершенствования технологии их восстановительного ремонта в направлении обеспечения конструктивной прочности восстанавливаемых элементов конструкции, не уступающей первоначальной, и сокращения стоимости и продолжительности ремонта.

1. Стальные термоупрочняемые детали упрочняют закалкой с последующим отпусканием, за исключением деталей из аустенитных сталей с карбидным и интерметаллидным упрочнением, а также мартенситностареющих сталей, подвергаемых после закалки искусственному старению. В зависимости от критической скорости закалки, для перезакалки отремонтированных стальных элементов конструкции воздушных судов может быть использован пульсирующий воздушный поток или пульсирующая водовоздушная смесь, причем в случае легированных сталей, используемых в основном для изготовления стальных элементов конструкции воздушных судов, авиационных двигателей и аэродромной техники, закалка в большинстве случаев может осуществляться без введения в пульсирующий дозвуковой воздушный поток охлаждающей жидкости. Результатом использования в качестве закалочной среды пульсирующего воздушного потока будет измельчение структуры мартенсита закалки и более высокая конструктивная прочность после окончательной термической обработки, в сравнении со стандартной закалкой в воде, масле, синтетических закалочных средах. При этом используемая среда более экономична и экологична в сравнении с машинным маслом и синтетическими закалочными средами. Вода же не может быть использована в

качестве закалочной среды для большинства легированных сталей из-за их склонности к растрескиванию. При закалке в пульсирующем воздушном или водовоздушном потоке благодаря сглаживанию пиков структурных напряжений под действием колебаний параметров потока, закалочная деформация и закалочные остаточные напряжения малы в сравнении с традиционными закалочными средами, что снижает количество брака при закалке и уменьшает вероятность растрескивания в период между закалкой и отпуском. Пульсирующий воздушный поток может быть использован как замена низкого отпуска при термообработке ремонтируемых элементов конструкции воздушных судов на высокопрочное состояние. Подобная технология позволяет в несколько раз уменьшить время термообработки без ущерба для механических и эксплуатационных свойств [1]. Особенно эффективна замена отпускного нагрева воздействием на закаленное изделие пульсирующим воздушным потоком, если закалка осуществлялась в том же потоке. В этом случае устраняется такой недостаток практикуемого термоупрочнения, увеличивающий его продолжительность, как разделение операций закалки и последующего отпуска [1]. Газоимпульсная обработка может быть использована в качестве дополнительной как после закалки с последующим низким отпуском (высокопрочное состояние), так и после широко применяемого к стальным деталям авиационной и аэродромной техники термоулучшения [1]. В том и другом случае техническим результатом использования технологии газоимпульсной обработки является повышение надежности отремонтированных деталей за счет повышения значений показателей ударной вязкости и пластичности без снижения показателей прочности. Данная технология может быть применена и к термоупрочненным элементам конструкции воздушных судов, не подвергавшимся восстановительному ремонту. В этом случае перезакаливанию не используется и газоимпульсная обработка осуществляется в качестве средства дополнительного повышения конструктивной прочности. Повысить значения пока-

зателей надежности термообработанных металлических элементов конструкции воздушных судов и авиационных двигателей, как подвергавшихся, так и не подвергавшихся повторной термической обработке после восстановительного ремонта вне зависимости от направления эксплуатационного нагружения, позволяет многосторонняя газоимпульсная обработка. Элементы конструкции воздушных судов изготавливают из термоупрочняемых титановых, алюминиевых и никелевых, магниевых и других сплавов. В процессе ремонта восстановление изношенных и поврежденных деталей также осуществляют наплавкой, создающей область крупнозернистого литого металла и зону термического влияния с пониженными механическими свойствами, которые в процессе эксплуатации могут стать источником разрушения, в особенности по линии сплавления. Для восстановления надежности на уровне исходных изделий, после использования наплавки или сварки их необходимо снова термоупрочнять. Цветные сплавы термоупрочняют закалкой с последующим старением. Закалка цветных сплавов традиционно осуществляется в воде, что в случае сложной конфигурации может привести к отклонениям от заданной формы. Для закалки изделий из титановых сплавов применяется пульсирующий водовоздушный поток, у которого при скорости пульсирующего воздушного потока от 25 до 30 м/с расход воды на закалку изделия составляет не более 1,5 л, что дополнительно обеспечивает после старения повышение столь важной для компрессорных лопаток твердости, а стало быть – износостойкости [1]. Аналогично могут закаливаться отремонтированные элементы конструкции из жаропрочных никелевых сплавов, а также магниевых сплавов. Закалка алюминиевых сплавов может быть осуществлена в пульсирующем дозвуковом воздушном потоке, начиная со скорости потока 20 м/с. При этом при последующем естественном старении наблюдается более интенсивный рост прочностных свойств в сравнении с закалкой в воде. Готовые термоупрочненные детали из цветных сплавов, так же как и термоупрочненные стальные детали,

перед установкой в отремонтированные узлы и агрегаты авиационной техники могут быть дополнительно обработаны пульсирующими воздушными потоками с целью повышения их конструктивной прочности и надежности.

2. Существенную часть элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники получают холодной объемной или листовой штамповкой, без дальнейшего термоупрочнения, при этом прочностные свойства определяются степенью пластической деформации либо изначально присутствующей в прежде всего листовом прокате или бесшовных трубах (как правило, 50 %), либо приобретаемой в процессе получения изделий пластическим формоизменением. Если восстановительный ремонт подобных элементов конструкции воздушного судна сопровождается нагревом, например при использовании газопламенной и электроконтактной сварки, подогрева при устранении вмятин и т. п., в зоне термического влияния, наклеп полностью или частично снимается, что приводит к опасному локальному разупрочнению элемента конструкции. Восстановить утраченные прочностные свойства позволит локальная обработка бездеформационными методами, в частности газоимпульсная обработка, при использовании которой упрочнение реализуется без снижения пластичности и ударной вязкости. При восстановлении утраченной первоначальной конфигурации элемента конструкции воздушного судна рихтовкой в поверхностных слоях могут возникать опасные растягивающие остаточные напряжения. В этом случае обработка пульсирующими газовыми потоками, в зависимости от режима обработки, позволит снять растягивающие остаточные напряжения до нулевого значения либо же создать в поверхностных слоях благоприятные сжимающие остаточные напряжения [1], способствующие повышению коррозионной стойкости и устойчивости к циклическим нагрузкам. Использование газоимпульсной обработки для ремонтируемых элементов конструкции воздушных судов наиболее эффективно при учете частоты собственных колебаний элемента конструкции [1], когда при совпадении частоты собственных колебаний

или кратной ей частоты с частотой колебаний параметров потока снимающие остаточные напряжения процессы интенсифицируются и продолжительность газоимпульсной обработки может быть снижена в два и более раза. Также газоимпульсная обработка позволяет обеспечить повышенную релаксационную стойкость витых пружин [1], имеющихся, в частности, в системе шасси.

3. При восстановительном ремонте термически не упрочненных литых элементов конструкции воздушного судна, прежде всего корпусных силуминовых изделий, размер зерна и, стало быть, механические свойства наплавленного материала зачастую отличаются в худшую сторону от остального изделия, кроме того, в зоне термического влияния происходит рост зерна, сопровождающийся снижением конструктивной прочности. Градиент температур при наплавке ведет к возникновению в поверхностных слоях литого элемента конструкции растягивающих остаточных напряжений. У ремонтируемых литых деталей газоимпульсная обработка зоны наплавки и термического влияния обеспечивает повышение механических свойств, а также снятие опасных растягивающих остаточных напряжений, что дополнительно повышает устойчивость к циклическим и динамическим нагрузкам, а также коррозионную стойкость [1].

Перспективным является использование бездеформационных технологий, позволяющих в ходе осуществления ремонта восстановить первоначальные прочностные свойства элементов конструкции воздушных судов, снизившихся под действием эксплуатационных факторов [10], таких как газоимпульсная обработка, которая, кроме того, при использовании в процессе восстановительного ремонта металлических элементов конструкции воздушных судов обеспечивает повышение таких механических и эксплуатационных свойств, как усталостная прочность, трещиностойкость, жаропрочность, хладостойкость [1].

Как и в случае восстановительного ремонта, перспективным является использование в ходе технического обслуживания воздушных судов и авиадвигателей технологий, основан-

ных на обработке материалов и изделий пульсирующими звуковыми воздушными потоками, позволяющих восстановить первоначальные прочностные свойства элементов конструкции воздушных судов, снизившихся под действием эксплуатационных факторов [18], и, более того, повысить их надежность. Так, остаточные напряжения, которые присутствуют в сварных конструкциях, эффективно снимаются газоимпульсной обработкой области сварного шва. Остаточные напряжения могут возникать не только в ходе изготовления элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей или их восстановительного ремонта, но и при эксплуатации. Регулярная обработка пульсирующим воздушным потоком или иными бездеформационными способами элементов конструкции воздушных судов, в которых могут образовываться остаточные напряжения, позволит предотвратить образование трещин, в том числе усталостных, эрозии, а также коробления, снижение статической, динамической и усталостной прочности. Дополнительная обработка пульсирующим воздушным потоком деталей воздушных судов и авиационных двигателей, подвергавшихся термообработке на высокопрочное состояние, применяемой, в частности, к переднему подшипнику компрессора – роликовому, который воспринимает нагрузку от веса и центробежную силу от дисбаланса ротора, и заднему подшипнику компрессора – шариковому, радиально-упорному, который кроме радиальной нагрузки воспринимает суммарную осевую нагрузку, действующую на ротор двигателя и равную разности осевых сил от роторов компрессора и турбины, обеспечит повышение надежности деталей за счет повышения значений показателей ударной вязкости и пластичности без снижения показателей прочности. То же относится к термоулучшенным валам авиадвигателей и деталям редукторов, нормализованным деталям авиационной и аэродромной техники. Данную обработку предлагается осуществлять непосредственно в ходе технического обслуживания воздушных судов. Пружины, которыми, к примеру, могут устанавливаться в исходное положение штоки

гидроцилиндров замков шасси после газоимпульсной обработки, осуществляющейся в процессе технического обслуживания, приобретут более высокую релаксационную стойкость, что будет способствовать безотказности работы всей системы шасси. Практикуется эксплуатация элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей с повреждениями, которые относят к незначительным. Например, для лопаток компрессора двигателя ТВ3-117 в ряде случаев могут допускаться забоины и вмятины глубиной до 1 мм и длиной до 5 мм. Важно предотвратить развитие подобных дефектов, особенно при повторном динамическом воздействии, что может быть обеспечено локальным восстановлением пластичности и ударной вязкости путем газоимпульсной обработки дефектной области. В случае лопаток входного направляющего аппарата можно производить обработку непосредственно на двигателе. Обдув следует осуществлять перпендикулярно поврежденной поверхности. Такое направление обработки обеспечивает значительный рост трещиностойкости и одновременно меньшую подверженность влиянию на структуру материала, а стало быть и достигнутый обработкой эффект воздушных потоков, обтекающих элемент конструкции воздушного судна в процессе эксплуатации. То же может быть отнесено к другим допускаемым трещинам и иным дефектам элементов конструкции воздушного судна, включая вентиляторные лопатки, стойки шасси, лопасти винта турбовинтового двигателя и любые другие элементы, в которых могут возникать повреждения от внешних воздействий и которые могут быть обработаны непосредственно на воздушном судне. Для сложнонагруженных элементов при использовании газоимпульсной обработки в ходе технического обслуживания с целью повышения их надежности, обеспечить необходимую изотропию свойств позволит многосторонний обдув. При обнаружении в ходе технического обслуживания трещин или забоин допустимого регламентом размера можно рекомендовать обработку поврежденных областей пульсирующими газовыми потоками, что позволит избежать их

распространения и обеспечить надежность в случае повторного внешнего динамического воздействия на ту же область.

Заключение

В заключение можно сделать вывод о том, что повышающая или восстанавливающая эксплуатационные свойства бездеформационная обработка пульсирующими газовыми потоками эффективна и может осуществляться в ходе выполнения всех форм технического обслуживания и ремонта воздушных судов.

Результаты исследований и расчетов в области использования технологий обработки элементов конструкции авиационных транспортных средств, оборудования и механизмов на основе пульсирующих звуковых воздушных потоков свидетельствуют о высокой эффективности их применения для решения задач повышения надежности и увеличения срока эксплуатации авиационных деталей, оптимизации сроков проверок и ремонтов.

Перечисленные методологические изменения, направленные на обнаружение таких дефектов, которые могут быть устранены газопульсной или иной бездеформационной обработкой, в практике организации технического обслуживания потребуют разработки рекомендаций по внесению изменений в соответствующие регламенты и программы.

Список литературы

1. **Иванов Д.А.** Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности. СПб.: СПбГУГА, 2017. 328 с.
2. **Tomblin J., Seneviratne W.** Determining the fatigue life of composite aircraft structures using life and load-enhancement factors // Report DOT/FAA/AR-10/6, June 2011. 155 p.
3. **Burhan I., Kim H.S.** S-N curve models for composite materials characterisation: an evaluative review // Journal of Composites Science. 2018. Vol. 2, iss. 3. ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038

4. **Лапаев А.В., Шапкин В.С.** К вопросу оценки влияния коррозионных поражений планера на летную годность воздушных судов по условиям усталостной прочности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 17–21.

5. **Разиньков Ф.Ф., Акопян К.Э.** Анализ изменения параметров коррозионных повреждений элементов конструкции центральной части фюзеляжа с увеличением сроков службы вертолетов типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 53–64.

6. **Роберов И.Г.** Комплексная диагностика технического состояния и оценка работоспособности металлических материалов методами неразрушающего контроля / И.Г. Роберов, Д.К. Фигуровский, М.А. Киселев, В.С. Грама, Д.Б. Матвеев, В.О. Иванов // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18, № 4. С. 178–181.

7. **Mishchenko A.** Analysis of residual stresses resulting from the surface preparation for X-ray diffraction measurement / A. Mishchenko, L. Wu, V.K. da Silva, A. Scotti // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018. Vol. 40, iss. 2. Article number: 94. DOI: 10.1007/s40430-018-1036-5

8. **Акопян К.Э.** Экспериментальная оценка влияния технологии восстановления материала конструкционных алюминиевых сплавов при коррозионном поражении на статическую прочность для решения задач по поддержанию летной годности воздушных судов / К.Э. Акопян, С.А. Грачев, А.В. Лапаев, В.К. Орлов, А.О. Титов, В.С. Шапкин, С.А. Школин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 8 (319). С. 7–15.

9. **Акопян К.Э.** Экспериментальная оценка влияния коррозионного поражения на статическую прочность конструкционного алюминиевого сплава / К.Э. Акопян, С.А. Грачев, А.В. Лапаев, В.С. Шапкин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 12 (323). С. 7–14.

10. **Далецкий С.В., Далецкий С.С.** Графические модели процесса технической эксплуатации воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 36–44.

11. **Ицкович А.А.** Повышение эффективности процессов поддержания летной годнос-

ти воздушных судов на основе методологии управления проектами / А.А. Ицкович, А.О. Чернов, Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 26–35.

12. Vaskic L., Paetzold K. A critical review of the integrated logistics support suite for aerospace and defence programmes // Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. ICED, 2019. Vol. 1, iss. 1. Pp. 3541–3550. DOI: 10.1017/dsi.2019.361

13. Strohmeier M. On perception and reality in wireless air traffic communication security / M. Strohmeier, M. Schäfer, R. Pinheiro, V. Lenders, I. Martinovic // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18, no. 6. Pp. 1338–1357. DOI: 10.1109/TITS.2016.2612584

14. Ben Mahmoud M.S., Larrieu N., Pirovano A. A risk propagation based quantitative-assessment methodology for network security-aeronautical network case study // 2011 Conference on Network and Information Systems Security. La Rochelle, 2011. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/SAR-SSI.2011.5931372

15. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Сельвсюк Н.И. Электрификация и интеллектуализация – основные тенденции развития энергокомплекса воздушных судов // Авиационные системы. 2016. № 5. С. 45–51.

16. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций: монография. Уфа: Уфимский полигр. комб., 2003. 803 с.

17. Оболенский Е.П., Сахаров Б.И., Стрекозов Н.П. Прочность агрегатов оборудования и элементов систем жизнеобеспечения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 248 с.

18. Иванов Д.А. Способ обработки металлических элементов конструкции воздушных судов. Патент RU № 2702885 С2, МПК C21D 7/00: опубл. 11.10.2019, Бюл. № 29. 4 с.

References

1. Ivanov, D.A. (2017). *The effect of unsteady gas flows on the structure and properties of materials used in the aviation industry*. St.Petersburg: SPbGUGA, 328 p. (in Russian)

2. Tomblin, J. & Seneviratne, W. (2011). *Determining the fatigue life of composite aircraft structures using life and load-enhancement factors*. Report DOT/FAA/AR-10/6, 155 p.

3. Burhan, I. & Kim, H.S. (2018). *S-N curve models for composite materials characterisation: an evaluative review*. Journal of Composites Science, vol. 2, issue 3, ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038

4. Lapaev, A.V. & Shapkin, V.S. (2014). *To the question of the evaluation of influence of corrosion defeats of the airframe on the flight validity of aircrafts under the terms of fatigue durability*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 4 (315), pp. 17–21. (in Russian)

5. Razinkov, F.F. & Akopyan, K.E. (2020). *Analysis of changes in parameters of corrosion damage to structural elements of the central fuselage with an increase in the service life of Mi-8 helicopters*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 32, pp. 53–64. (in Russian)

6. Roberov, I.G., Figurovsky, D.K., Kiselev, M.A., Grama, V.S., Matveev, D.B. & Ivanov, V.O. (2020). *Integrated diagnostics of technical condition and serviceability evaluation of metal materials by nondestructive testing methods*. Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii, vol. 18, no. 4, pp. 178–181. (in Russian)

7. Mishchenko, A., Wu, L., da Silva, V.K. & Scotti, A. (2018). *Analysis of residual stresses resulting from the surface preparation for X-ray diffraction measurement*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 40, issue 2, article number: 94. DOI: 10.1007/s40430-018-1036-5

8. Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapaev, A.V., Orlov, V.K., Titov, A.O., Shapkin, V.S. & Shkolin, S.A. (2015). *Experimental assessment of influence of technology of restoration of material constructional aluminum alloys at corrosion defeat on static durability for the solution of tasks of maintenance of the flight validity of aircrafts*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 8 (319), pp. 7–15. (in Russian)

9. Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapaev, A.V. & Shapkin, V.S. (2016). *Experimental assessment of corrosion defeat on static durability for constructional aluminum alloy*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 12 (323), pp. 7–14. (in Russian)

10. Daletskiy, S.V. & Daletskiy, S.S. (2017). *Graphical models of the aircraft maintenance process*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 36–44. (in Russian)

11. Itskovich, A.A., Chernov, A.O., Faynburg, G.D. & Faynburg, I.A. (2017). *Increasing the aircraft airworthiness maintenance efficiency based on the project management methodology*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)

12. Vaskic, L. & Paetzold, K. (2019). *A critical review of the integrated logistics support suite for aerospace and defence programmes*. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. ICED, vol. 1, issue 1, pp. 3541–3550. DOI: 10.1017/dsi.2019.361

13. Strohmeier, M., Schäfer, M., Pinheiro, R., Lenders, V. & Martinovic, I. (2017). *On perception and reality in wireless air traffic communication security*. IEEE Transactions on Intelligent

Transportation Systems, vol. 18, no. 6, pp. 1338–1357. DOI: 10.1109/TITS.2016.2612584

14. Ben Mahmoud, M.S., Larrieu, N. & Pirovano, A. (2011). *A risk propagation based quantitative assessment methodology for network security-aeronautical network case study*. 2011 Conference on Network and Information Systems Security, La Rochelle, pp. 1–9. DOI: 10.1109/SAR-SSI.2011.5931372

15. Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V. & Selvesyuk, N.I. (2016). *Electrification and intellectualization are the main trends in the development of the aircraft power complex*. Aviatsionnyye sistemy, no. 5, pp. 45–51. (in Russian)

16. Shanyavsky, A.A. (2003). *Tolerance fatigue failures of aircraft components: Monograph*. Ufa: Ufimskiy poligraficheskiy kombinat, 803 p. (in Russian)

17. Obolensky, E.P., Sakharov, B.I. & Strekozov, N.P. (1989). *Strength of equipment aggregates and elements of aircraft life support systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 248 p. (in Russian)

18. Ivanov, D.A. (2019). *A method of processing metal elements of the aircraft structure*. Patent RU, no. 2702885 C2, MPK C21D 7/00: publ. October 11, byulyuten no. 29, 4 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Иванов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (СПбГУ ГА), ivanov.denis.71@mail.ru.

Петрова Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, и. о. заведующего кафедрой авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (СПбГУ ГА), ptata@ya.ru.

Information about the authors

Denis A. Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aeronautical Equipment and Diagnostics Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, ivanov.denis.71@mail.ru.

Tatyana V. Petrova, Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Aeronautical Equipment and Diagnostics Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, ptata@ya.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

16.01.2022
23.03.2022

Received
Accepted for publication

16.01.2022
23.03.2022