

УДК 621.78

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-61-71

Исследование воздействия нестационарных воздушных потоков на механические и эксплуатационные свойства элементов конструкции воздушных судов

Д.А. Иванов¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А.А. Новикова,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: Использование обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком (газоимпульсной обработки) в процессе технического обслуживания и ремонта продолжительностью, не превышающей определенного значения, способствует восстановлению и повышению механических и эксплуатационных свойств элементов конструкции авиационной техники. В данной статье приводятся результаты исследования, направленного на определение оптимальной продолжительности газоимпульсной обработки авиационных деталей, в качестве которой была принята продолжительность обработки, обеспечивающая максимальное повышение показателей вязкости материала, являющейся препятствием для развития трещин, без снижения прочностных свойств. В результате исследования было оценено влияние различных факторов, таких как скорость дозвукового воздушного потока и частота колебаний, материал и геометрические параметры обрабатываемого изделия как на оптимальную, так и на приводящую к снижению механических свойств продолжительность обработки пульсирующим воздушным потоком элементов конструкции воздушного судна в процессе технического обслуживания и ремонта. Установлено, что механические волны, генерируемые пульсациями газового потока, способны оказывать существенное влияние на конструктивную прочность элементов конструкции воздушных судов, что позволяет повысить их надежность, а также точность прогнозирования технического состояния. Экспериментально установлен гармонический характер затухания отношения остаточных напряжений к исходным их значениям в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки, что позволяет управлять их величиной и знаком. Получена эмпирическая формула, позволяющая определять оптимальную продолжительность обработки для изделий различных материалов. В качестве показателя продолжительности газоимпульсной обработки было принято повышение вязкости материала без снижения прочностных свойств. Построены графические зависимости относительного времени газоимпульсной обработки, обеспечивающего повышение показателей механических свойств от относительной частоты колебаний газового потока.

Ключевые слова: воздушный транспорт, техническое обслуживание, газоимпульсная обработка.

Для цитирования: Иванов Д.А. Исследование воздействия нестационарных воздушных потоков на механические и эксплуатационные свойства элементов конструкции воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 2. С. 61–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-61-71

Investigation of the impact of unsteady air flows on the mechanical and operational properties of aircraft structural elements

D.A. Ivanov¹

¹*Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal
A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia*

Abstract: The use of pulsating subsonic gas flow treatment (gas pulse treatment) in the process of maintenance and repair for a duration not exceeding a certain value contributes to the restoration and improvement of mechanical and operational properties of aeronautical equipment structural elements. This article presents the results of a study to determine the optimal duration of gas-pulse processing of aircraft parts, as which, the duration of processing was adopted, providing the maximum increase in the

properties of material viscosity, which prevents crack development without reducing the strength properties. As a result of the study, the influence of various factors, such as the subsonic airflow velocity and the frequency of oscillations, the material and geometric parameters of the processed product, on both the optimal and leading to a decrease in mechanical properties duration of processing by pulsating airflow of aircraft structural elements during maintenance and repair, was evaluated. It has been established that mechanical waves generated by gas flow pulsations can have a significant impact on the structural strength of aircraft structural elements, which makes it possible to increase their reliability as well as the accuracy of forecasting the technical condition. The harmonic nature of the attenuation of the ratio of residual stresses to their initial values has been experimentally established, depending on the duration of gas pulse treatment, which allows us to control their magnitude and sign. An empirical formula has been obtained to determine the optimal processing time for products of various materials. As an indicator of the duration of gas pulse treatment, an increase in the viscosity of the material was adopted without reducing the strength properties. Graphical dependences of the relative time of gas pulse processing, which provides an increase in the mechanical properties of the relative frequency of the gas flow oscillations, have been constructed.

Key words: air transport, maintenance, gas pulse processing.

For citation: Ivanov, D.A. (2023). Investigation of the impact of unsteady air flows on the mechanical and operational properties of aircraft structural elements. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 2, pp. 61–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-61-71

Введение

Отказы техники продолжают оставаться одной из причин летных происшествий, при полете менее 2000 часов после ремонта зачастую выявляются и очаги коррозии, и трещины, поэтому развитие методологии технического обслуживания и ремонта является актуальной проблемой эксплуатации воздушного транспорта [1–17]. Одним из путей решения данной проблемы является разработка методов технического обслуживания и ремонта на основе результатов новейших исследований влияния технологических и эксплуатационных факторов на структуру материалов элементов конструкции авиационной техники, определяющую их механические и эксплуатационные свойства [1]. Нестационарный воздушный поток является значимым эксплуатационным фактором, оказывающим воздействие на структуру материалов элементов конструкции авиационной техники и тем самым на их механические и эксплуатационные свойства. В процессе эксплуатации воздушного судна продолжительное воздействие нестационарных звуковых газовых потоков может приводить к снижению конструктивной прочности элементов конструкции. Вместе с тем использование обработки пульсирующим звуковым газовым потоком (газоимпульсной обработки) в процессе технического обслуживания и ремонта продол-

жительностью, не превышающей определенного значения, способствует восстановлению и повышению механических и эксплуатационных свойств элементов конструкции авиационной техники [1]. В данной статье приводятся результаты исследования, направленного на определение оптимальной продолжительности газоимпульсной обработки авиационных деталей, в качестве которой была принята продолжительность обработки, обеспечивающая максимальное повышение показателей вязкости материала, являющейся препятствием для развития трещин, без снижения прочностных свойств.

Постановка задачи

При использовании таких бездеформационных технологий повышения и восстановления конструктивной прочности элементов конструкции воздушного судна, как газоимпульсная обработка, в процессе их технического обслуживания и ремонта возникает вопрос о необходимой продолжительности данной обработки, а также о продолжительности обработки, по достижении которой дальнейшее воздействие газовых импульсов будет оказывать негативное влияние на комплекс механических и эксплуатационных свойств. Планировалось получение результатов исследования влияния различных факторов, таких как скорость звукового воздушного потока и частота коле-

баний, материал и геометрические параметры обрабатываемого изделия, как на оптимальную, так и на приводящую к снижению механических свойств продолжительность обработки пульсирующим воздушным потоком элементов конструкции воздушного судна.

Решение задачи

Механические волны, возникающие при взаимодействии пульсирующего дозвукового воздушного потока с поверхностью обрабатываемого металлического изделия, воздействуют на структуру его материала, прежде всего дислокационную, что влечет за собой изменение механических и эксплуатационных свойств [1].

Экспериментально установлено, что скорость изменения механических и эксплуатационных свойств обрабатываемого металлического изделия существенным образом зависит от близости частоты пульсаций давления воздушного потока, натекающего на обрабатываемый элемент конструкции, от частоты его собственных колебаний.

Когда частота колебаний параметров воздушного потока мало отличается от частоты собственных колебаний элемента конструкции, резонансный эффект обеспечивает снижение продолжительности газоимпульсной обработки, необходимой для требуемого повышения механических свойств.

В случае элементов конструкции авиационной техники частота собственных колебаний в условиях консольного крепления f_p может достигать значения нескольких тысяч герц, и следовательно, для достижения эффекта резонанса требуется такая же частота пульсаций воздушного потока f .

В связи с тем что, как показали исследования, уменьшение требуемой продолжительности газоимпульсной обработки может быть достигнуто при более низких, в сравнении с частотой собственных колебаний элемента конструкции воздушного судна значениях частоты пульсаций давления дозвукового газового потока, при условии их кратности частоте собственных колебаний обрабатыва-

емого изделия, газоимпульсная обработка сравнительно небольшой продолжительности может успешно применяться при частоте колебаний параметров газового потока в несколько сотен герц.

Когда же частота колебаний параметров воздушного потока существенно отличается от частоты собственных колебаний обрабатываемого элемента конструкции и частот, ей кратных, происходит существенное увеличение продолжительности газоимпульсной обработки, необходимой для требуемого повышения механических свойств.

По результату анализа эмпирических значений была получена следующая формула:

$$\bar{\tau} = 2 - 2/\bar{f} + 1/\bar{f}^2, \quad (1)$$

где $\bar{\tau} = \tau/\tau_0$, $\bar{f} = f/f_p$, τ – оптимальная продолжительность газоимпульсной обработки, в качестве которой была принята продолжительность обработки, обеспечивающая максимальное повышение показателей ударной вязкости материала, не приводящее к снижению прочностных свойств, таких как значение предела прочности, τ_0 – оптимальная продолжительность газоимпульсной обработки, в случае когда частота колебаний параметров воздушного потока тождественна частоте собственных колебаний элемента конструкции, которая составляет порядка 6 минут. График зависимости изменения продолжительности обработки пульсирующим воздушным потоком, требуемой для достижения максимальной вязкости стали без снижения показателей прочности, от частоты его пульсаций представлен на рис. 1.

При значении f/f_p 0,3 и более данная формула обеспечивает хорошую сходимость с экспериментально полученными результатами. При f/f_p менее трех десятых требуемая продолжительность газоимпульсной обработки скачкообразно увеличивается. При значении частоты пульсаций f более f_p значение τ/τ_0 не выше двух.

Газоимпульсная обработка может способствовать повышению механических и эксплуатационных свойств. Вместе с тем экспе-

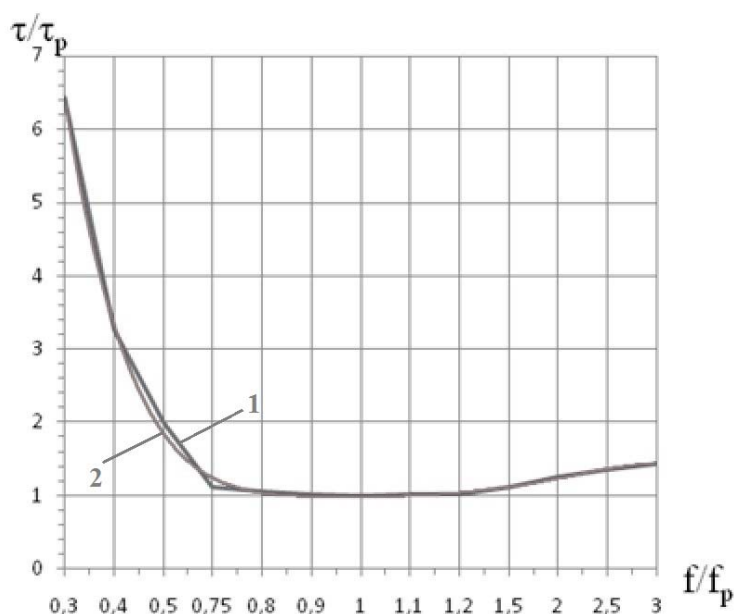


Рис. 1. Изменение продолжительности обработки пульсирующим воздушным потоком, требуемой для достижения максимальной вязкости стали без снижения показателей прочности, в зависимости от частоты его пульсаций: 1 – по экспериментальным данным; 2 – в соответствии с формулой (1)

Fig. 1. Change of the duration of treatment with pulsating air flow required to achieve maximum steel viscosity without reducing strength indicators, depending on the frequency of its pulsations: 1 – according to experimental data; 2 – according to the formula (1)

риментально установлена опасная продолжительность воздействия нестационарных дозвуковых воздушных потоков на элементы конструкции воздушного судна при частотах колебаний, близких к резонансным, которые могут возникать, к примеру, при выбеге двигателя. Результаты исследования обеспечивают повышение точности прогноза технического состояния при эксплуатации воздушных судов. Вместе с тем кратковременная газоимпульсная обработка может способствовать повышению механических и эксплуатационных свойств.

Также было установлено, что в интервале 40–130 дБ значение величины звукового давления оказывает незначительное влияние на оптимальную продолжительность газоимпульсной обработки.

Представленные в табл. 1 результаты экспериментальных исследований с использованием образцов из алюминиевого сплава АМгЗ показывают не только возможность повышения механических свойств, таких как предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ в результате газоимпульсной обработки, но и накопление

эффекта от воздействия нестационарными воздушными потоками структурой материала, о чем свидетельствует совпадение результатов непрерывной и дискретной обработки с интервалом 2 недели (табл. 1). Изготовление, отбор и испытание образцов осуществлялись в соответствии с ГОСТ 14019-2003.

Таблица 1
Table 1

Сравнительные результаты непрерывной дискретной газоимпульсной обработки образцов из алюминиевого сплава АМгЗ с использованием малошумного генератора
Comparative results of continuous discrete gas pulse processing of samples made of aluminum alloy АМg3 using a low-noise generator

Продолжительность обработки	0 мин	5 + 5 мин	10 мин
$\sigma_{изг}$, МПа	368	390	390

Были проведены исследования изменения механических свойств конструктивных элементов авиационной и аэродромной техники

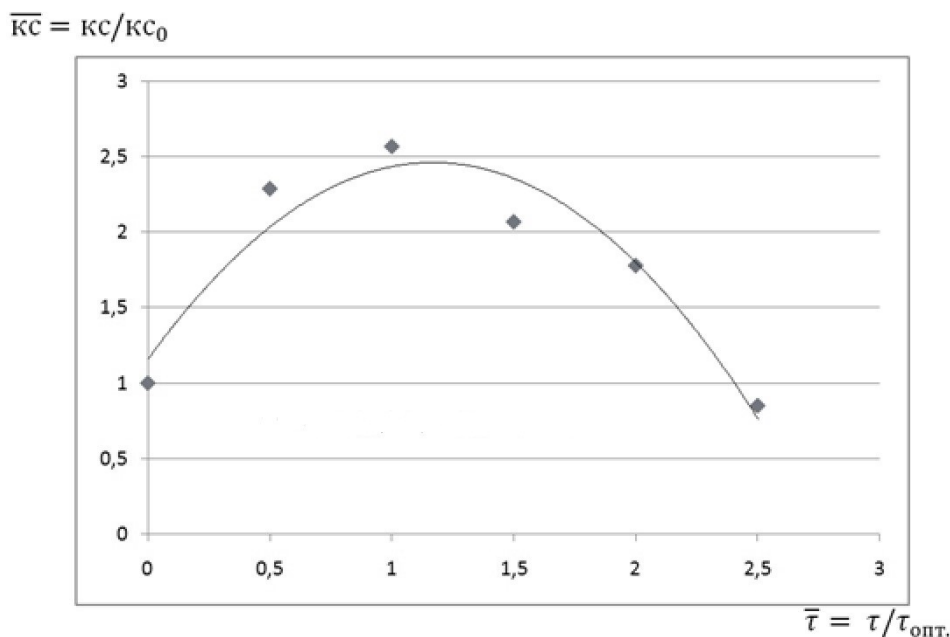


Рис. 2. Изменение сопротивления динамическому изгибу в зависимости от продолжительности обработки пульсирующим дозвуковым воздушным потоком

Fig. 2. Change of dynamic bending resistance depending on the duration of treatment with pulsating subsonic airflow

из металлических материалов более 30 марок при воздействии нестационарных воздушных потоков.

На рис. 2 представлена обобщенная зависимость относительной ударной вязкости от относительного времени обдува, где Kc – значение ударной вязкости обдутьного образца, τ – продолжительность обдува, мин, Kc_0 – значение ударной вязкости необдутьного образца, $\tau_{\text{опт.}}$ – оптимальная продолжительность обдува, соответствующая наибольшему росту ударной вязкости при отсутствии снижения прочностных свойств. Изготовление, отбор и испытание образцов осуществлялись в соответствии с ГОСТ 9454-78.

Видно, что по достижении определенного оптимального значения продолжительности дальнейшая обработка ведет к снижению значений показателей механических свойств.

При определении оптимального времени обдува можно использовать формулу

$$\tau_{\text{опт.}} = K_{\tau_{\text{опт.}}} \cdot 20, \quad (2)$$

где 20 – характерное время обдува, мин, $K_{\tau_{\text{опт.}}}$ – значение поправочного коэффициента,

найденные эмпирически для различных сочетаний скорости обдува V и частоты колебаний натекающего потока (табл. 2), где $M = V/a$, $\bar{f} = f/f_0$, a – скорость звука в потоке.

Одним из факторов, влияющих на производительность газоимпульсной обработки, может являться скорость дозвукового воздушного потока. Исследование влияния скорости дозвукового воздушного потока V на производительность газоимпульсной обработки проводилось, в частности, с помощью образцов из конструкционной улучшаемой легированной стали 38ХН и др. в соответствии с ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 1497-84.

Установлено, что при увеличении скорости натекающего на стальной образец дозвукового воздушного потока на порядок, с 20 до 200 метров в секунду, время газоимпульсной обработки, необходимое для достижения максимального значения показателей вязкости материала, не приводящего к снижению значений предела прочности, уменьшается менее чем в 3 раза, с 26,2 до 10 мин (рис. 3).

Результаты исследования позволили получить эмпирическую формулу для определения оптимального времени воздействия

Таблица 2
Table 2

Экспериментально полученные значения $K_{\tau_{\text{опт.}}}$
Experimentally obtained values $K_{\tau_{\text{опт.}}}$

$\bar{f}$ М	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,05	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
0,1	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
0,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,87	0,6
0,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
0,4	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5
0,5	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5

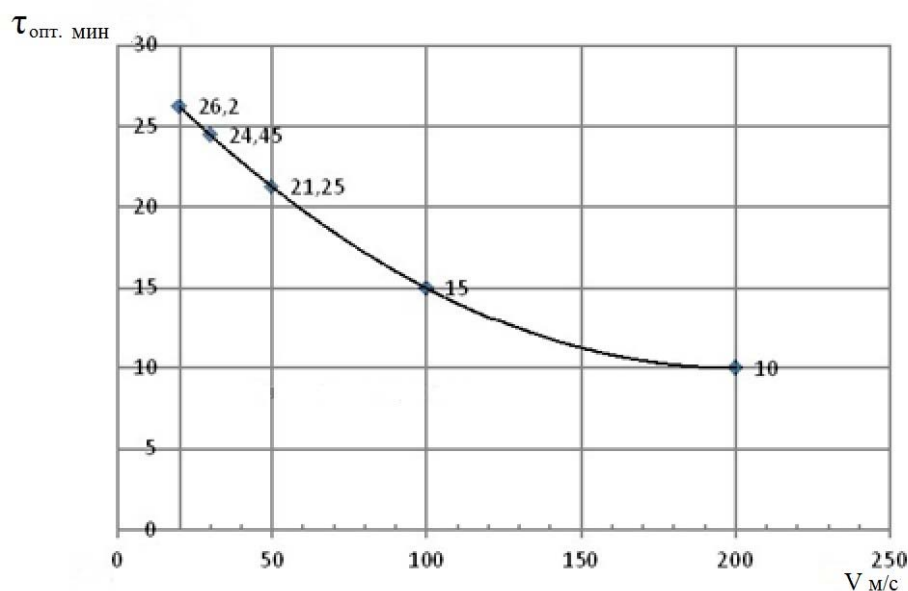


Рис. 3. Изменение времени газоимпульсной обработки, необходимого для достижения максимального значения показателей вязкости материала в зависимости от скорости натекающего на стальной образец воздушного потока

Fig. 3. Change of the gas pulse processing time required to achieve the maximum value of the material viscosity indices depending on the air flow velocity flowing onto the steel sample

пульсирующего воздушного потока на стальное обрабатываемое изделие, обеспечивающую хорошую сходимость с экспериментальными результатами при частоте пульсаций до 1000 Гц:

$$\tau_{\text{опт}} = 0,0005V^2 - 0,2V + 30. \quad (3)$$

Данной формулой удобнее пользоваться при некруглых значениях скоростей газового

потока, для которых отсутствуют эмпирические коэффициенты $K_{\tau_{\text{опт.}}}$.

Продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект в случае сплава на основе цветного металла, будет равна

$$\tau_{\text{м}} = k_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{с}}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{с}} = \tau_{\text{опт}}$ для стали = $0,0005V^2 - 0,2V + 30$,

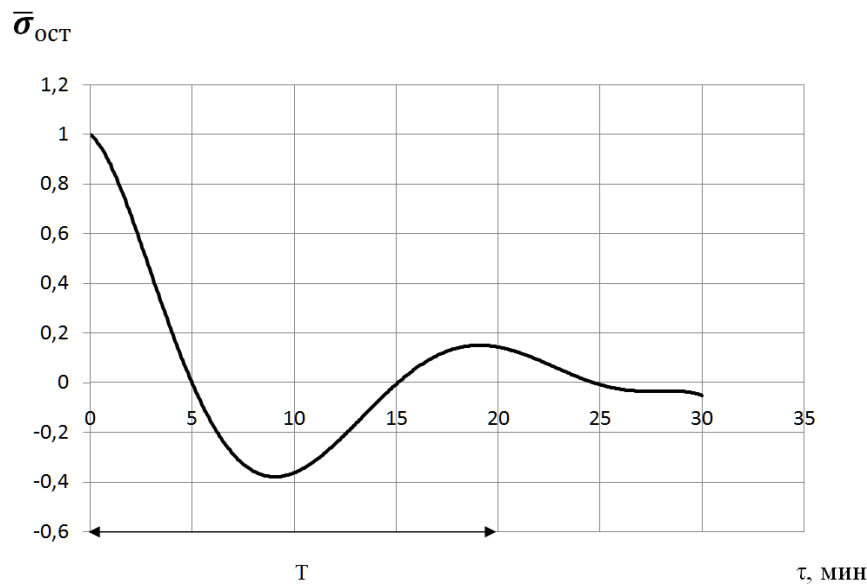


Рис. 4. Изменение остаточных напряжений в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки

Fig. 4. Change of residual stresses depending on the duration of gas pulse treatment

а $k_m = a_c/a_m$ – отношение скорости звука в стали a_c к скорости звука в сплаве на основе данного металла a_m .

Используя газоимпульсную обработку, можно не только полностью снять опасные растягивающие напряжения, но и получить на поверхности изделия сжимающие остаточные напряжения, которые во многих случаях являются желательными, так как повышают устойчивость к коррозии и усталостному разрушению.

Испытания осуществлялись в соответствии с характеризующимся высокой достоверностью методом Давиденкова, основанном на разрезании и измерении кольцевых образцов.

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод, что под действием механических волн, возникающих при воздействии газовых импульсов на поверхность обрабатываемого изделия, остаточные напряжения меняются во времени в соответствии с уравнением, описывающим кривую, представляющую собой графическое изображение затухающих колебаний:

$$y = A \cdot e^{-ax} \sin(\omega x + \varphi_0), \quad (5)$$

где A – амплитуда в первоначальный момент времени, a – коэффициент затухания, ω – циклическая частота, φ_0 – начальная фаза колебаний. Применительно к изменению во времени величины растягивающих тангенциальных остаточных напряжений формула будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \sigma_{ост}/\sigma_{ост0} = e^{-0,1\tau} \cdot \cos(\omega\tau), \quad (6)$$

где τ – продолжительность газоимпульсной обработки, $\sigma_{ост0}$ – первоначальное значение растягивающих тангенциальных остаточных напряжений на поверхности изделия, $\sigma_{ост}$ – их текущее значение. Изменение остаточных напряжений в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки представлено на графике (рис. 4).

Исследования показали, что если в изделии до обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками в поверхностных слоях присутствуют растягивающие тангенциальные (окружные) остаточные напряжения, представляющие наибольшую опасность с точки зрения образования и развития трещин, а также коррозии, то их нулевого значения можно добиться при продолжительности

обработки $0,25T$, где T представляет собой период порядка 20 минут.

Меняя продолжительность газоимпульсной обработки в большую или меньшую сторону, можно получать различные значения и знак остаточных напряжений, в том числе получать на поверхности изделия сжимающие остаточные напряжения максимальной величины, что будет способствовать устойчивости изделия к циклическим нагрузкам и повысит его коррозионную стойкость.

В подтверждение достоверности формулы можно привести уровень тангенциальных остаточных напряжений на поверхности колец подшипников качения одной партии из стали ШХ15 в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки. Нулевые значения остаточных напряжений достигаются на 8-й и 18-й минуте обработки, а между ними находится область сжимающих остаточных напряжений.

Заключение

В результате исследования было оценено влияние различных факторов, таких как скорость дозвукового воздушного потока и частота колебаний, материал и геометрические параметры обрабатываемого изделия, как на оптимальную, так и на приводящую к снижению механических свойств продолжительность обработки пульсирующим воздушным потоком элементов конструкции воздушного судна в процессе технического обслуживания и ремонта.

Установлено, что механические волны, генерируемые пульсациями газового потока, способны оказывать существенное влияние на конструктивную прочность элементов конструкции воздушных судов, что позволяет повысить их надежность, а также точность прогнозирования технического состояния.

Экспериментально установлен гармонический характер затухания отношения остаточных напряжений к исходным их значениям в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки, что позволяет управлять их величиной и знаком.

Получена эмпирическая формула, позволяющая определять оптимальную продолжительность обработки для изделий различных материалов. В качестве показателя продолжительности газоимпульсной обработки было принято повышение вязкости материала без снижения прочностных свойств.

Построены графические зависимости от носительного времени газоимпульсной обработки, обеспечивающего повышение показателей механических свойств от относительной частоты колебаний газового потока.

Таким образом, в целом решен вопрос о необходимой продолжительности данной обработки, а также о продолжительности обработки, по достижении которой дальнейшее воздействие газовых импульсов будет оказывать негативное влияние на комплекс механических и эксплуатационных свойств элементов конструкции обслуживаемой и ремонтируемой авиационной техники.

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. **Burhan I., Kim H.S.** S-N curve models for composite materials characterisation: an evaluative review [Электронный ресурс] // Journal of Composites Science. 2018. Vol. 2, iss. 3. ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038 (дата обращения: 17.09.2022).
3. **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.
4. **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.

5. 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.

6. 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 [Электронный ресурс] // 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 (дата обращения: 17.09.2022).

7. 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.

8. 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.

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

10. Ицкович А.А. Повышение эффективности процессов поддержания летной годности 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.

11. Vaskic L., Paetzold K. A critical review of the integrated logistics support suite for aerospace and defence programmes // Proceedings of the Design Society: International Confer-

ence on Engineering Design. ICED, 2019. Vol. 1, iss. 1. Pp. 3541–3550. DOI: 10.1017/dsi.2019.361

12. 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

13. 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

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

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

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

17. 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.

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. Burhan, I., Kim, H.S. (2018). S-N curve models for composite materials characterization: an evaluative review. *Journal of Composites Science*, vol. 2, issue 3, ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038 (accessed: 17.09.2022).

3. Lapae, A.V., Shapkin, V.S. (2014). To the question of the evaluation of influence of corrosion defects of the airframe on the flight va-

lidity 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)

4. **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)

5. **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)

6. **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 (accessed: 17.09.2022).

7. **Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapae, 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)

8. **Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapae, 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)

9. **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)

10. **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)

11. **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

12. **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

13. **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

14. **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)

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

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

17. **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.

Сведения об авторе

Иванов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», ivanov.denis.71@mail.ru.

Information about the author

Denis A. Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aviation Engineering and Diagnostics Chair, FSFEI HE Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, ivanov.denis.71@mail.ru.

Поступила в редакцию 11.11.2022
Принята в печать 23.03.2023

Received 11.11.2022
Accepted for publication 23.03.2023