

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДОЗВУКОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

*Д.А. Иванов, к.т.н., доц., В.С. Зюкин, асп., А.А. Колосков, асп.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

Представлены результаты исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники и авиационных двигателей при воздействии нестационарных воздушных потоков.

Найдены оптимальная продолжительность и интенсивность обработки. Показано, что методы повышения механических свойств, обеспечивающих надежность элементов конструкции воздушных судов с использованием нестационарных воздушных потоков применимы не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта.

Установлено, что продолжительное воздействие нестационарных воздушных потоков в условиях эксплуатации воздушного судна способствует снижению механических свойств элементов конструкции авиационной техники и авиадвигателей.



и недостатки, очерчены рамки, в которых она действует, установлены причины, порождающие тот или иной результат. Все это требует проведения широкомасштабных экспериментальных и теоретических исследований, анализа полученных результатов и выдачи соответствующих рекомендаций.

В ходе проведенного исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники при воздействии нестационарных воздушных потоков, воздействие нестационарными воздушными потоками на поверхность изделий осуществлялось с использованием газоструйных генераторов колебаний параметров потока на основе свистков Гальтона и Гавро, а также генераторов, основывающихся на перекрывании потока газа.

Исследования проводились на образцах и изделиях из металлических материалов более 40 марок, используемых при изготовлении элементов конструкции воздушных судов, авиадвигателей и аэродромной техники [1–10].

В зависимости от размеров изделий и особенностей используемых газоструйных генераторов, обрабатываемые изделия размещались либо в рабочей камере, либо снаружи генерирующего пульсирующие дозвуковые воздушные потоки устройства и подвергалось воздействию газовых импульсов, обладающих частотой от нескольких сотен до нескольких тысяч герц (в зависимости от частоты собственных колебаний обрабатываемого изделия) продолжительностью от нескольких минут до часа и более. Звуковое давление при этом варьировалось от 40 до 140 дБ.

Истоки неисправностей элементов конструкции воздушных судов и авиационных двигателей, снижающих эффективность эксплуатации воздушного транспорта, заключаются в недостаточной надежности элементов конструкции, связанной с несовершенством используемых методов повышения их конструктивной прочности, механических и эксплуатационных свойств.

Повышение эффективности и безопасности авиаперевозок может быть реализовано посредством использования новейших технологий, направленных на управление готовностью технических средств, а также разработки мер по оптимизации сроков профилактических проверок и ремонтов за счет учета фактора влияния внешней среды на элементы конструкции воздушных судов и аэродромной техники, оборудования и механизмов при прогнозировании технического состояния.

Использование на практике той или иной методологии оправдано лишь в том случае, если доказана ее эффективность, выявлены достоинства

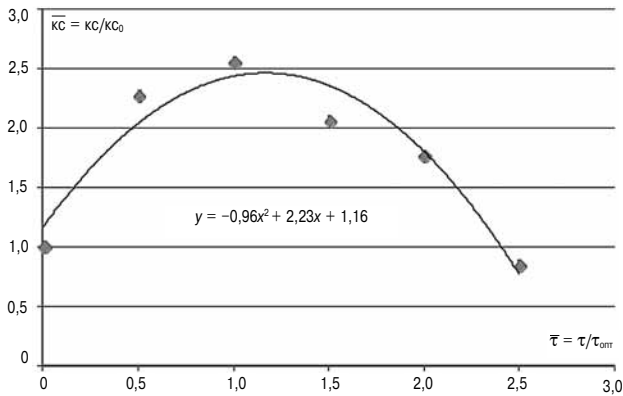


Рис. 1. Зависимость относительной ударной вязкости от относительного времени обдува

Для стальных изделий обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка) осуществлялась как после окончательной термической обработки, такой как нормализация, закалка с последующим низким, средним или высоким отпуском, так и в сочетании с процессами термообработки при их осуществлении. Также газоимпульсная обработка применялась к деформационно-упрочненным стальным изделиям, нашедшим широкое применение в аэродромной технике. Подобным же образом обрабатывались изделия и образцы из термически упрочняемых и неупрочняемых титановых, алюминиевых, магниевых сплавов, а также сплавов на основе меди и цинка.

Техническим результатом стали существенное повышение показателей пластичности и ударной вязкости, в том числе при низких температурах, в сравнении со стандартно обработанными изделиями, с сохранением или получением более высоких прочностных свойств. На рис. 1 представлена зависимость ударной вязкости конструкционных металлических материалов от времени обработки нестационарными дозвуковыми воздушными потоками. Здесь K_C — значение ударной вязкости обдутого образца, τ — продолжительность обдува, мин, K_{C_0} — значение ударной вязкости необдутого образца, $\tau_{опт}$ — оптимальная

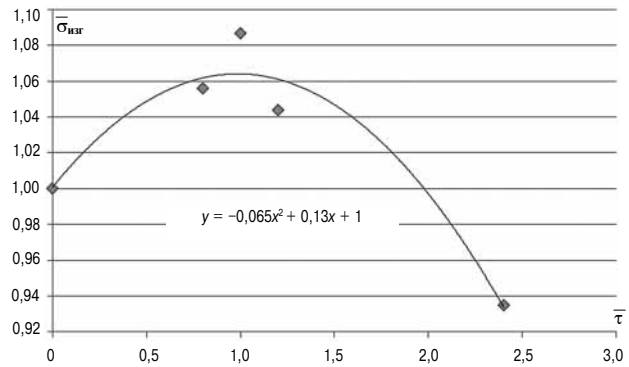


Рис. 2. График зависимости относительной изгибной прочности $\bar{\sigma}_{изг} = \sigma_{изг} / \sigma_0$ от относительного времени обдува $\bar{\tau} = \tau / \tau_{опт}$

продолжительность обдува, при котором значение ударной вязкости максимально.

При определении оптимального времени обдува можно использовать формулу $\tau_{опт} = K_{топт} \cdot 20$, где 20 — характерное время обдува, мин, $K_{топт}$ — значение поправочного коэффициента для различных сочетаний скорости обдува V и частоты колебаний натекающего потока (табл. 1), где $M = V / a$, $\bar{f} = f / f_0$, a — скорость звука в потоке.

В ходе исследований существенное внимание было уделено возможности повышения механических свойств крепежа, применяемого в авиационной и аэродромной технике, как существенного элемента, влияющего на безопасность. На графике рис. 2 представлена зависимость изгибной прочности стального болта М6 от продолжительности обработки дозвуковым пульсирующим воздушным потоком с частотой пульсаций 500 Гц и звуковым давлением 40 дБ. Болты располагали вдоль потока, обдув осуществлялся со стороны головки. Наибольший рост изгибной прочности составил 8,7 % и не сопровождался снижением пластичности и ударной вязкости. После 25 минут обдува наблюдается снижение положительного эффекта, а после 50 минут обдува прочность становится ниже, чем у необработанного. Это означает, что при длительном воздействии натекающих на головки болтов воздушных потоков в процессе эксплуатации воздушного судна, их прочностные свойства могут снижаться. То же относится и к другим элементам конструкции воздушных судов, испытывающих воздействие натекающих воздушных потоков.

В ходе оценки возможности сокращения продолжительности газоимпульсной обработки за счет увеличения скорости газового потока установлено, что для элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники, изготовленных из конструкционных среднеуглеродистых сталей, типа 40, 40Х, 40ХС и др. при частоте пульсаций до 1000 Гц установлено следующее:

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента $K_{\tau_{опт}}$ при определении оптимального времени обдува

$f \setminus M$	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

При скорости потока V менее 20 м/с продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект составляет более 30 минут. При скорости потока 200 м/с продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект, достигает минимального значения, составляющего 10 мин и дальнейшее увеличение скорости потока в дозвуковой области не приводит к ее снижению, при том, что высоким скоростям потока соответствуют наибольший уровень шума.

При частоте пульсаций воздушного потока менее 1000 Гц оптимальная продолжительность обработки при скорости пульсирующего воздушного потока V может быть определена при помощи следующей эмпирической зависимости:

$$\tau_{\text{опт}} = 0,005 \cdot V^2 - 0,2 \cdot V + 30.$$

Зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока представлена на графике рис. 3.

$$V_{200} / V_{20} = 10 \text{ и } \tau_{20} / \tau_{200} = 2,62.$$

Таким образом, при увеличении скорости пульсирующего воздушного потока в 10 раз продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект, возрастает лишь в 2,6 раза при практически тех же достигаемых значениях показателей механических свойств.

Полученную эмпирическую зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока можно использовать для элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники из сплавов на основе цветных металлов, таких как алюминий, магний, титан, никель, бериллий, медь, цинк и других при использовании соответствующего поправочного коэффициента, учитывающего отношение ско-

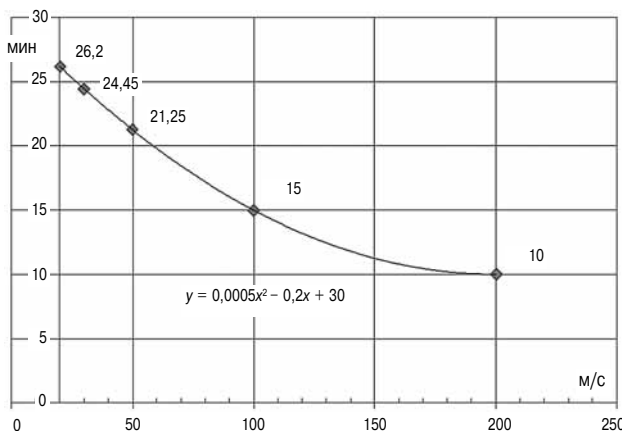


Рис. 3. Зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока

рости звука в сплавах на основе данного металла от скорости звука в стали.

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

$$\tau_{\text{м}} = k_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{с}},$$

где $\tau_{\text{с}} = \tau_{\text{опт}}$ для стали = $0,005 \cdot V^2 - 0,2 \cdot V + 30$; $k_{\text{м}} = a_{\text{с}} / a_{\text{м}}$ — отношение скорости звука в стали $a_{\text{с}}$ к скорости звука в сплаве на основе данного металла $a_{\text{м}}$.

Таблица 2

Значения поправочных коэффициентов для определения оптимальной продолжительности обработки элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники из сплавов на основе цветных металлов

Основа сплава	Al	Be	Mg	Cu	Ni	Zn	Ti
$k_{\text{м}}$	0,99	0,39	1,1	1,41	1,02	1,36	1,22

Значения поправочных коэффициентов $k_{\text{м}}$ представлены в таблице 2.

При этом установлено, что наибольший рост пластичности и вязкости наблюдается в направлении обдува при газоимпульсной обработке.

Разработана технология, позволяющая обеспечить требуемую изотропию свойств изделия за счет последовательного обдува в нескольких направлениях.

Была поставлена задача восстановления прочностных свойств металлических элементов конструкции воздушных судов, снизившихся в результате действия натекающих на них в процессе эксплуатации воздушных потоков.

Решение поставленной задачи достигается тем, что металлический элемент конструкции воздушного судна, прочностные свойства которого снизились в результате натекания на него воздушного потока в эксплуатации, подвергают воздействию пульсирующего дозвукового воздушного потока, имеющего частоту 400–2000 Гц и звуковое давление 40–140 дБ при комнатной температуре в направлении, противоположном направлению воздействия натекающего воздушного потока в процессе эксплуатации.

Так, в результате продолжительного натекания нестационарных воздушных потоков со стороны головки стального болта М6, являющегося крепежным элементом воздушного судна, его изгибная прочность снизилась с 939 до 861 МПа или более чем на 8 %.

Обработка данного болта пульсирующим дозвуковым воздушным потоком, имеющим частоту 500 Гц и звуковое давление 40 дБ в течение 20 минут в продольном направлении со стороны

торца болта, позволила восстановить его изгибную прочность до исходного значения.

Механические волны, генерируемые пульсациями газового потока при взаимодействии с изделием, воздействуя на дислокационную структуру материала металлического изделия, способны оказывать влияние на его прочностные свойства.

С точки зрения дислокационной теории заблокированным перед препятствиями дислокациям легче двигаться в направлении, противоположном к их движению при исходном воздействии.

Поэтому с целью устранения неблагоприятного расположения дислокаций в элементах конструкций воздушных судов и авиадвигателей (включая крепеж), возникающих под действием натекающих воздушных потоков, эффективна их обработка пульсирующим газовым потоком в направлении, противоположном направлению воздействия.

При обработке используются среднечастотные колебания, так как высокочастотные (более 2000 Гц) колебания переносят малую долю энергии.

Таким образом, был получен технический результат, а именно восстановление прочностных свойств металлического элемента конструкции воздушного судна.

Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии обработки пульсирующим газовым потоком на статическую и динамическую прочность изделий при условии ее продолжительности, не превышающей определенное время, зависящее от размера обрабатываемого изделия и амплитудно-частотных характеристик газового потока (отношение частоты колебаний газового потока к частоте собственных колебаний изделия).

Экспериментально установлено, что дискретное воздействие нестационарного воздушного потока на элемент конструкции воздушного судна той же суммарной продолжительности, что и непрерывное, обеспечивает аналогичный технический результат, то есть эффект от воздействия нестационарных воздушных потоков накапливается структурой материала.

Методы повышения механических свойств, обеспечивающих надежность элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей с использованием газоимпульсной обработки применимы

не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта. Вместе с тем установлено, что продолжительное воздействие нестационарных воздушных потоков, которое имеет место при эксплуатации воздушного судна, способствует снижению механических свойств элементов конструкции авиационной техники, обеспечивающих надежность.

Результаты проведенных исследования показали, что для существенного, в том числе негативного изменения структуры и свойств материалов элементов конструкции авиационной техники при натекании на них нестационарных воздушных потоков в процессе эксплуатации не требуется значительной скорости потока или звукового давления.

Литература

1. *Иванов Д.А.* Повышение конструктивной прочности материалов за счет воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков: монография. — СПб. : Изд-во СПбГУЭС, 2008. — 123 с.
2. *Бульчев А.В., Иванов Д.А.* Воздействие газоимпульсной обработки на структуру, свойства и напряженное состояние металлических изделий // *Технология металлов.* — 2013. — № 11. — С. 30–33.
3. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Использование пульсирующего дозвукового газового потока для повышения эксплуатационных свойств металлических изделий // *Технология металлов.* — 2015. — № 1. — С. 34–38.
4. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Повышение коррозионной стойкости конструкционных сталей газоимпульсной обработкой // *Технология металлов.* — 2015. — № 10. — С. 27–31.
5. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Газоимпульсная обработка закаленных сталей // *Технология металлов.* — 2017. — № 6. — С. 17–22.
6. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки // *Двигателестроение.* — 2012. — № 3. — С. 12–15.
7. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // *Двигателестроение.* — 2014. — №3. — С. 34–36.
8. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Сочетание закалки сталей с обработкой пульсирующими газовыми потоками // *Двигателестроение.* — 2015. — №4. — С. 34–36.
9. *Иванов Д.А., Засухин О.Н.* Влияние условий газоимпульсной обработки на механические свойства сталей // *Двигателестроение.* — 2016. — №4. — С. 30–34.
10. *Иванов Д.А.* Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности: монография. — СПб. : СПбГУГА, 2017. — 328 с.