

## СНЯТИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

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

В процессе восстановительного ремонта деталей авиадвигателей широко используются такие технологии, как наплавка и приваривание вставок малой толщины аргонодуговой сваркой. При этом значительные остаточные напряжения полностью снять нагревом невозможно без негативных последствий для структуры материала изделия.

Представлены результаты исследования, показывающие, что воздействие пульсаций воздушного потока без применения нагрева позволяет эффективно управлять остаточными напряжениями металлических элементов конструкций, в том числе устранить нежелательные растягивающие напряжения на поверхности металлических деталей авиадвигателей, что уменьшает риск образования трещин в процессе их эксплуатации.

В процессе восстановительного ремонта деталей авиадвигателей широко используются такие технологии, как наплавка и приваривание вставок аргонодуговой сваркой. При этом локальный нагрев выше температуры плавления приводит к возникновению значительных остаточных напряжений. Полностью их снять нагревом, который в основном применяется для этих целей на практике, невозможно без таких негативных последствий для структуры материала изделия, как рост зерен, коагуляция карбидных и интерметаллидных включений. К тому же остаточные напряжения снимаются до минимального значения при данной температуре за 1,5–2 часа. Методы поверхностной пластической деформации мало пригодны для снятия остаточных напряжений в деталях авиадвигателей, так как дробеструйная обработка, центробежно-шариковый (роликовый) наклеп недопустимо ухудшают чистоту поверхности, а накатывание стальным шариком (роликом) и алмазное выглаживание оправкой трудно реализуемо для деталей сложной формы, что, кроме прочего, ведет к изменению линейных размеров.

Поэтому задача по осуществлению эффективного управления напряжениями в изделиях малой толщины с высокими требованиями к



качеству поверхности, для которых ограниченно применимы методы снятия остаточных напряжений поверхностной пластической деформацией является актуальной. Для управления остаточными напряжениями в элементах конструкции авиационной техники представляется перспективным использование бездеформационных методов, таких как воздействие пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка).

Остаточными напряжениями принято называть такие напряжения, которые существуют и уравновешиваются внутри твердого тела после установления причин, вызвавших их появление. Остаточные напряжения всегда являются внутренними, поскольку они самоуравновешиваются внутри твердого тела или жесткого агрегата. Образование остаточных напряжений всегда связано с неоднородными пластическими деформациями в смежных объемах материала или агрегата, вызванными внешним деформирующим воздействием, градиентом температур по сечению изделия при быстром охлаждении или неоднородностью и неравномерностью фазовых превращений, связанных с изменениями объема.

Задача механических методов определения остаточных напряжений состоит в том, чтобы по известной совокупности значений перемещений или деформации определить вызвавшие их напряжения.

Исследования остаточных напряжений проводились в соответствии с методом Давиденкова, примененным к кольцевым образцам.

В кольцевых образцах значения тангенциальных остаточных напряжений уменьшаются от поверхности к центру и после прохождения нейтрального слоя меняют свой знак на противо-

положительный. При распределении остаточных напряжений по толщине кольца, близком к линейному, в слое, удаленном от поверхности на расстояние  $a$

$$\sigma_{\Theta(a)} = \pm 2 \frac{E \delta_p}{(1 - \mu^2) D_{cp}^2} (h/2 - a), \quad (1)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $D_{cp}$  — средний диаметр кольца до разрезки;  $h$  — толщина кольца напротив разреза;  $\delta_p$  — изменение диаметра кольца после разрезки.

За толщину кольца принималась толщина тонкой части, в которой определялась величина остаточных напряжений. По тонкой части кольца определялся и диаметр.

Верхний знак в формуле (1) используется при снятии наружных слоев, нижний — внутренних.

На поверхности кольца

$$\sigma_{\Theta} = \pm \frac{E \delta_p h}{(1 - \mu^2) D_{cp}^2}. \quad (2)$$

В последней формуле знак «+» соответствует наружной поверхности кольца, а «-» — внутренней.

Было проведено исследование влияния газоимпульсной обработки [1–10] без осуществления предварительного нагрева на остаточные напряжения в тонкостенных кольцевых трубных элементах конструкции авиадвигателей, авиационной и аэродромной техники.

Исследования проводились на установке, представляющей собой газоструйный генератор типа свистка Гавро с цилиндрическим осесимметричным резонатором, на дне которого для подачи сжатого воздуха соосно с резонатором закреплен газоход. Противоположный торец газохода с помощью плоской круглой крышки образует щелевое кольцевое сопло, ширина которого регулируется сменными втулками. Накладная гайка фиксирует положение сменного кольцевого ножа, имеющего клиновидный профиль с острием, направленным в сторону щелевого сопла. Такое устройство генератора позволяло варьировать удаление клинового ножа от среза сопла, ширину щели сопла и взаимное положение ножа относительно кромок сопла. Верная струя, натекая на кольцевой нож, создает условия для возбуждения режимов нестационарного наполнения и опорожнения резонатора, что вызывает колебательное движение верной струи. Резонатор располагался вертикально и сверху на него монтировалась при помощи резьбового соединения цилиндрическая успокоительная камера, призванная обеспечить равномерное распределение скорости газового потока по всему поперечному сечению. Над успокоительной камерой размещались пред-

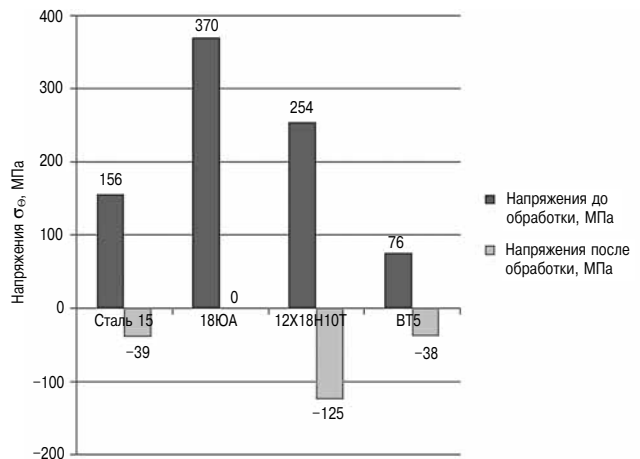


Рис. 1. Уровень тангенциальных остаточных напряжений на поверхности металлических кольцевых изделий до и после газоимпульсной обработки

назначенные к обработке пульсирующим газовым потоком изделия.

Продолжительность обработки составляла от 10 до 20 мин, при частоте колебаний параметров потока — 1–2 кГц.

Результаты газоимпульсной обработки на напряженное состояние поверхности изделий из конструкционных металлических материалов приведены на гистограмме рис. 1.

Растягивающие остаточные напряжения обозначены знаком «+», а сжимающие — знаком «-».

Приведенные результаты показывают, что газоимпульсная обработка оказывает влияние не только на величину, но и на знак остаточных напряжений на поверхности изделий, при этом величина напряжений уменьшается.

Дополнительно было проведено более детальное исследование влияния продолжительности газоимпульсной обработки на величину тангенциальных остаточных напряжений в поверхностных слоях металлических изделий.

В качестве объекта исследований была выбрана бесшовная холоднокатаная труба наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 1,1 мм, изготовленная из стали 12Х18Н9Т, используемой в двигателестроении.

Ширина вырезанных колец — 10 мм. Тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности кольца составляли +183 МПа.

Обдув в течение 5 минут пульсирующим газовым потоком при частоте пульсаций 1130 Гц и звуковом давлении, равном 122 дБ, обеспечил снижение поверхностных тангенциальных остаточных напряжений на 70 % (до +55 МПа), а в течение 10 минут — на 75 % (до +46 МПа), что является неплохим результатом, если принять во внимание сочетание высокой вязкости материала

с пределом прочности 1100–1300 МПа (в наклепанном состоянии).

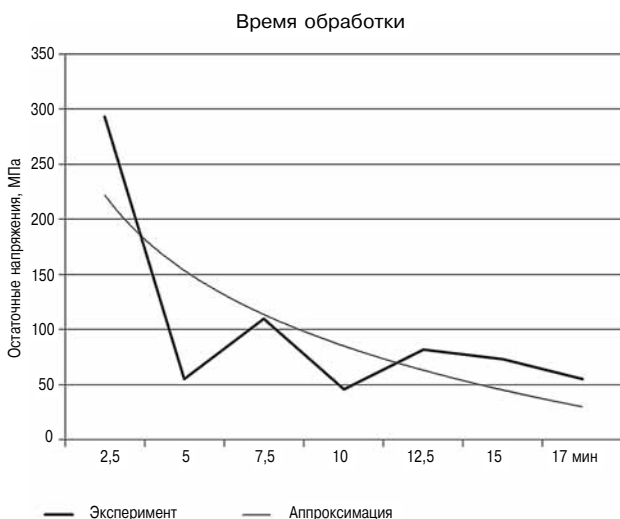
Экспериментально получена следующая зависимость тангенциальных остаточных напряжений от продолжительности обдува: 2,5 мин — +293 МПа; 5 мин — +55 МПа; 7,5 мин — +110 МПа; 10 мин — +46 МПа. 12,5 мин — +82 МПа; 15 мин — +73 МПа; 17,5 мин — +55 МПа (см. график рис. 2).

Периодическое увеличение значений уровня тангенциальных остаточных напряжений в процессе обдува может быть связано с уменьшением влияния осевых и радиальных остаточных напряжений, обладающих противоположным знаком вследствие их релаксации.

Таким образом, было установлено, что существует оптимальная с точки зрения уровня и знака остаточных напряжений на поверхности изделия продолжительность газоимпульсной обработки, зависящая от материала, геометрических параметров образца, а также от амплитудно-частотных характеристик самого потока.

Дальнейшее продолжение обдува делает процесс менее технологичным и может привести к снижению положительного эффекта от газоимпульсной обработки.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования, газоимпульсная обработка металлических изделий, включая элементы конструкции воздушных судов и аэродромной техники, является эффективным средством управления величиной и знаком остаточных напряжений, возникших в процессе изготовления изделия, его эксплуатации и восстановительного ремонта.



**Рис. 2.** Зависимость тангенциальных остаточных напряжений от продолжительности газоимпульсной обработки кольцевых образцов, вырезанных из бесшовной холоднокатаной трубы наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 1,1 мм, изготовленная из стали 12X18H9T

При этом основной фактор, определяющий величину и знак остаточных напряжений, — время обдува.

Принимая, что в начальный момент обдува остаточные напряжения в поверхностных слоях изделия положительные (растягивающие), то есть представляющие наибольшую опасность при эксплуатации, можно добиться их нулевого значения за время обработки  $T/4$ , где  $T$  — период порядка 20 мин.

Продолжая газоимпульсную обработку, можно получить на поверхности изделия сжимающие остаточные напряжения, которые во многих случаях желательные, так как повышают устойчивость к коррозии и усталостному разрушению. Отрицательные (сжимающие) остаточные напряжения растут по модулю до момента времени, соответствующего  $T/2$ , при этом модуль их значений составляет не более 40 % от исходного значения остаточных напряжений  $\sigma_{ост0}$ .

При дальнейшей обработке изделия остаточные напряжения, не меняя знака, уменьшаются по модулю до нулевого значения (момент времени  $3/4T$ ) и, меняя знак на положительный, достигают максимального значения в момент времени  $T$ , причем величина остаточных напряжений в момент  $T$  значительно меньше исходной.

Следствием продолжения обдува будет повторение вышеописанного процесса со значительно меньшими значениями остаточных напряжений в сравнении с первым периодом и к моменту времени  $3/4T$  уровень остаточных напряжений практически не меняется и остается близким к нулю.

Таким образом, процесс изменения остаточных напряжений при газоимпульсной обработке сходен с процессом затухания колебаний и может быть описан соответствующим уравнением:

$$y = A \cdot e^{-ax} \sin(\omega x + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $A$  — начальная амплитуда колебаний (положительная величина);  $a$  — коэффициент затухания;  $A \cdot e^{-ax}$  — мгновенное значение амплитуды;  $(\omega x + \varphi_0)$  — фаза колебаний;  $\omega = 2\pi/T$  — циклическая частота;  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний.

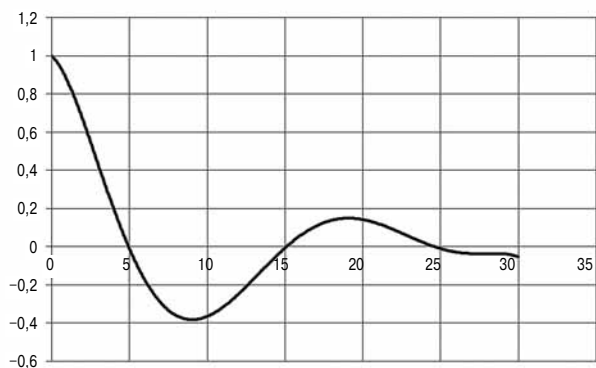
Обработка экспериментальных данных позволила получить следующую эмпирическую формулу:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост0} / \sigma_{ост0} = e^{-0,1\tau} \cdot \cos(\omega\tau), \quad (4)$$

где  $\tau$  — время обдува.

Зависимость  $\sigma_{ост}/\sigma_{ост0}$  от времени обдува представлена на рис. 3.

Газоимпульсной обработке подвергались стальные кольца подшипников, используемые в конструкции воздушных судов. Кольца подшипников подвергаются в процессе эксплуатации циклическим и знакопеременным нагружениям, поэтому для обеспечения длительной эксплуатации



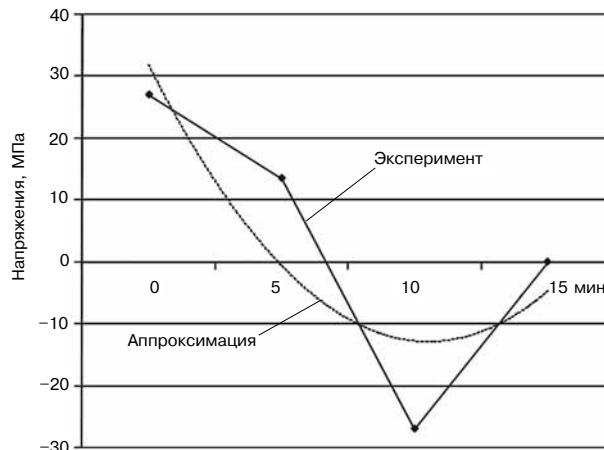
**Рис. 3.** Зависимость отношения значений остаточных напряжений к их исходному значению от продолжительности обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком

подшипника следует исключить наличие на поверхности его колец нежелательных растягивающих напряжений, чему может способствовать их газоимпульсная обработка. Кольца подшипников подвергают закалке на мартенсит с последующим низким отпуском для сохранения высокой твердости и износостойкости. При этом на поверхности колец подшипников часто возникают понижающие их долговечность растягивающие остаточные напряжения. Подобные напряжения могут образовываться в результате процесса шлифования поверхности колец с целью придания их поверхности необходимой чистоты.

Тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности необработанного кольца составили +27 МПа, в результате обдува в течение 5 минут их значение снизилось до +13,5 МПа, после газоимпульсной обработки в течение 10 минут остаточные напряжения на поверхности стали сжимающими -27 МПа и на 15-й минуте обработки показали нулевое значение (см. график рис. 4). Таким образом, характер зависимости уровня остаточных напряжений на поверхности изделия от продолжительности газоимпульсной обработки сохранился неизменным.

В дальнейшем обработка дозвуковым пульсирующим воздушным потоком подвергали кольцевые образцы из алюминиевого сплава АМг6 наружным диаметром 33 мм, шириной кольца 7 мм, толщиной стенки 1,2 мм. Обдув осуществлялся в течение 15 мин. Тангенциальные остаточные растягивающие напряжения составляли на поверхности 122 МПа и после обработки пульсирующим газовым потоком свелись к нулю.

Результаты проведенных исследования показали, что воздействие пульсаций воздушного потока без применения нагрева позволяет эффективно управлять остаточными напряжениями металлических элементов конструкций, в том числе устранить нежелательные растягивающие



**Рис. 4.** Уровень тангенциальных остаточных напряжений на поверхности колец подшипника качения из стали ШХ15 в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки

напряжения на поверхности металлических деталей авиадвигателей, что уменьшает риск образования трещин в процессе их эксплуатации.

#### Литература

1. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности материалов за счет воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков. Монография. — СПб.: СПбГУЭСЭ, 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.