

## **Эффективность применения поверхностного деформирования в авиастроении**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»  
Государственное предприятие «Антонов»  
Киевский авиационный техникум*

В статье рассматривается процесс поверхностного пластического деформирования алюминиевых сплавов Д16-Т, В93-Т и стали 30ХГСНМА методами виброударной и дробеструйной обработки. Экспериментальными данными доказано, что более эффективным является метод дробеударной обработки, обеспечивающей равнопрочность сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое материала, что обеспечивает более высокую усталостную прочность.

**Ключевые слова:** поверхностное пластическое деформирование, виброупрочнение, дробеструйное упрочнение, сжимающие остаточные напряжения, усталостная прочность, поверхностный слой материала, технологический режим обработки.

### **Введение**

В процессе эксплуатации самолётная конструкция работает в условиях одновременного воздействия циклических нагрузок и вибраций с различными сочетаниями амплитуд и частот, что отрицательно сказывается на долговечности их деталей и узлов. Характер действующих нагрузок и сложная форма конструкций деталей, а также жёсткие требования к экономии веса делают конструкцию чрезвычайно напряжённой в условиях эксплуатации.

Наибольшие напряжения возникают в зоне конструктивных концентраторов напряжений, выполненных в виде отверстий, галтельных переходов, различной формы переходных сечений и т. п. Наложение дополнительных напряжений в зоне концентраторов от технологических условий сборки и эксплуатации повышает чувствительность материалов к зарождению и развитию усталостных трещин в этих зонах.

Качество и эксплуатационные свойства изготавливаемых деталей в значительной степени зависят от способа получения исходных заготовок, способа обработки деталей, шероховатости их поверхности и качества поверхностного слоя. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения. Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций. Остаточные сжимающие напряжения, возникающие в поверхностном слое, повышают циклическую прочность деталей, т. к. они разгружают поверхностные слои от напряжений, вызванных нагрузками и, наоборот, растягивающие остаточные напряжения уменьшают прочность деталей вследствие повышения напряженности поверхностного слоя [1, 2].

Наиболее эффективной мерой повышения усталостной долговечности элементов конструкций является уменьшение уровня действующих напряжений в зоне концентраторов напряжений различными технологическими методами. Такими мето-

дами, обеспечивающими повышение надёжности и долговечности изделий, является упрочняющая обработка деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Повышение усталостной долговечности при упрочнении ППД связано с формированием в поверхностном слое материала остаточных напряжений сжатия и развитой дислокационной субструктуры, препятствующей зарождению и развитию усталостных трещин. Максимальной усталостной долговечности соответствует определённый уровень поверхностной твёрдости и остаточных напряжений, причём максимум этих свойств достигается в определённом диапазоне значений интенсивности упрочнения [3, 4].

Способ упрочнения деталей определяется в зависимости от материала, формы и размеров элементов детали, возможностью подхода к упрочняемым поверхностям. Поверхностный наклёп при осуществлении упрочняющих операций выравнивает структурные неоднородности, устраняя концентраторы напряжений. Это происходит в результате того, что при обработке мягких структур наклёп происходит интенсивнее, чем у твёрдых, их микротвёрдость при этом выравнивается. Кроме этого, местные растягивающие напряжения подавляются вновь созданными при наклёпе сжимающими напряжениями, и весь поверхностный слой металла становится равнонапряжённым. Остаточные напряжения в конце упрочняющей операции будут сжимающими [5, 6].

Ниже рассмотрены виброударный и дробеструйный методы упрочнения, основанные на использовании кинетической энергии металлических частиц, которые под давлением сжатого воздуха ударяются об поверхность обрабатываемой детали (панель, обшивка, фитинги и др.) для направленного изменения геометрической формы её поверхности и упрочнения, либо одного упрочнения.

Физическая сущность этого метода заключается в следующем. Частицы, летящие с большой скоростью, при ударе оставляют на поверхности детали небольшие лунки (глубина в несколько микрометров), в результате чего появляется слой сжатия, повышающий сопротивление усталости деталей [7, 8].

Изгибающий момент зависит от глубины слоя наклёпа, напряжения сжатия и отношения между толщиной детали и глубиной наклёпанного слоя. По мере изгиба детали в нижних слоях материала с её внутренней стороны также возникают сжимающие напряжения. Изгиб детали происходит до тех пор, пока напряжения сжатия со стороны выпуклой (обрабатываемой) и вогнутой (необрабатываемой) поверхностей не уравновесятся. Кривизна обрабатываемого участка детали зависит от интенсивности обработки и степени насыщения поверхности.

Степень насыщения поверхности — это процентное отношение площади, подвергнутой воздействию дроби, ко всей площади детали. Она определяется потоком дробинок в потоке и временем его воздействия на деталь.

### **Вибрационная обработка**

От других методов виброобработка отличается низкой скоростью соударения частиц рабочей среды (наполнителя) и деталей ( $V_{уд} = 1,5 — 2,0$  м/сек) против 30 — 70 м/сек при дробеструйной обработке. Объёмное виброупрочнение производится стальными шариками, при этом шероховатость поверхности уменьшается на 1 — 2 класса, а глубина распространения остаточных напряжений достигает

150 — 200 мкм. Улучшение качественных показателей позволяет повысить предел усталостной прочности деталей на 30 — 40% и увеличить их ресурс.

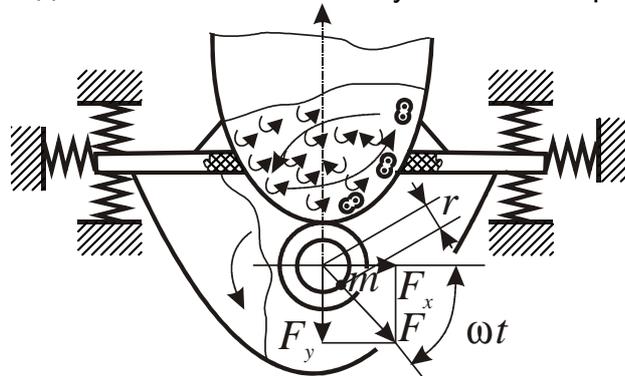


Рис. 1. Схема виброобработывающей машины

Основные характеристики виброобработывающих машин (рис. 1) следующие:

- $m$  — максимальный вес полезной загрузки, кг;
- $Q$  — максимальный объем резервуара;
- $V_{\max}$  — максимальное значение виброскорости и виброускорения, допустимые конструкцией машины при максимальном весе полезной загрузки и без неё (при работе в холостую);
- $Q_{\max}$  — сумма веса контейнера  $Q_k$ , веса деталей с приспособлениями  $Q_d$  и вес максимального количества рабочей среды, загруженной в контейнер,  $Q_3$ .

Вместе с весом подвижной частицы виброустановки  $Q_{п.ч.}$  в вес полезной нагрузки входит вес колеблющейся массы  $Q_{пр.}$ , который при заданном весе дебалансного груза определяет для зарезонансных машин, максимальную амплитуду колебаний [11]:

$$A_{\max} = \frac{G \cdot r}{Q_{пр}}. \quad (1)$$

Для виброобработки закреплённых деталей:

$$Q_{пр} = Q_{п.ч.} + Q_k + Q_d + KQ_3, \quad (2)$$

для загрузки контейнера «навалом»:

$$Q_{пр} = Q_{п.ч.} + Q_k + K(Q_d + Q_3), \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий режим движения частиц рабочей среды с «подбрасыванием».

Для  $U$ -образных контейнеров  $K$  принимают равным 0,6 [11].

Виброскорость и виброускорение определяют режим обработки.

В определённый момент времени виброскорость равна:

$$V = A \cdot \omega \cdot \sin \omega t, \quad (4)$$

а виброускорение:

$$v = A \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t. \quad (5)$$

Режим виброобработки характеризуется максимальными значениями виброскорости и виброускорения:

$$V_{\max} = A \cdot \omega = 2\pi \cdot A \cdot f; \quad (6)$$

$$V_{\max} = A \cdot \omega^2 = 4\pi^2 \cdot A \cdot f^2 \approx 40 \cdot A \cdot f^2; \quad (7)$$

где  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  — частота колебаний, гц;

$A$  — амплитуда, мм.

В работающих установках виброускорение сравнивают с ускорением силы тяжести  $g$ , равным  $9,81 \text{ м/сек}^2$ , и, как правило, рекомендуют  $10 — 12 g$  при амплитуде от 1 до 10 мм.

Для работающих современных вибромашин рекомендованные значения виброскорости от  $V_{\max} 0,3$  до  $1,0 \text{ м/сек}$ , и виброускорения  $V_{\max}$  от  $10$  до  $12 g$  и циклической частоте колебаний  $50 — 20 \text{ гц}$ .

В реальных условиях существует два способа виброобработки деталей:

а) со свободной загрузкой деталей «навалом», в том числе с закреплением деталей на подвижной раме в контейнере вибромашины;

б) с закреплением деталей на неподвижной (изолированной от колебаний) подставке.

Загрузке «навалом» подвергаются мелкие и средние детали весом до  $1 \text{ кг}$ .

Детали значительных размеров (свыше  $500 \text{ мм}$ ), весом более  $5 \text{ кг}$  и сложной ажурной конфигурации подвергаются закреплению в контейнере. Считается, что способ с закреплением деталей в  $2 — 4$  раза выше по производительности способа обработки «навалом».

### Дробеструйная обработка

При дробеударном формообразовании роль изгибающего усилия играют остаточные сжимающие напряжения, возникающие в поверхностном слое металла заготовки со стороны обрабатываемой поверхности (рис. 2).

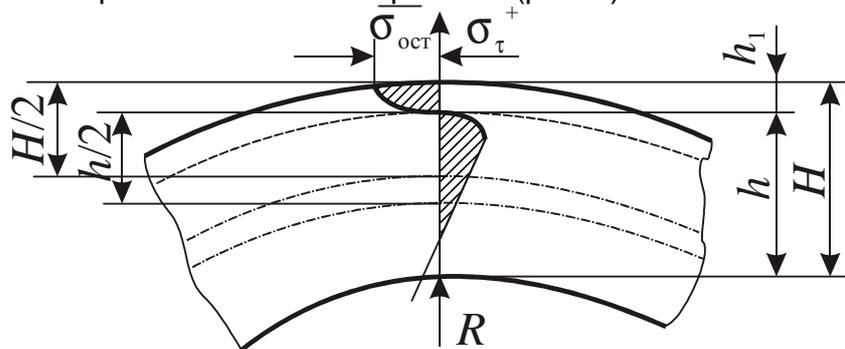


Рис. 2. Эпюра остаточных напряжений по сечению изогнутой пластины:  $H$  — толщина пластины;  $h_1$  — глубина «наклёпанного» слоя;  $\sigma$  — напряжения

Радиус кривизны ( $R$ ) формообразующей детали определяется по формуле:

$$R = \frac{D_{\text{пр}}}{M_{\text{изг}}}; \quad (8)$$

где  $D_{\text{пр}}$  — приведенная жесткость заготовки;

$M_{\text{изг}}$  — изгибающий момент.

$$D_{\text{пр}} = \frac{D_x \cdot D_y (1 - \mu^2)}{D_y - \mu \cdot D_x}; \quad (9)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;

$D_x$  — цилиндрическая жёсткость заготовки в направлении, параллельном рёбрам жёсткости:

$$D_x = \frac{E \cdot H^3}{12(1 - \mu^2)}; \quad (10)$$

$D_y$  — цилиндрическая жёсткость заготовки в направлении, перпендикулярном рёбрам жёсткости:

$$D_y = \frac{E \cdot H^2}{12(1 - \mu^2)} + \frac{E \cdot j}{L}; \quad (11)$$

где  $H$  — номинальная толщина полотна, мм;

$E$  — модуль упругости;

$j$  — момент инерции сечения ребра жёсткости относительно его центральной оси, см<sup>4</sup>;

$L$  — расстояние между ребрами жёсткости, мм.

Для упрощённых расчётов на практике используют формулу для определения приведённой жёсткости заготовки

$$D_{\text{пр}} \approx \frac{E \cdot H^2}{12}; \quad (12)$$

а изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{\text{изг}} = S \cdot \Delta\sigma_{\text{пол}} \cdot \frac{H - h_1}{2}; \quad (13)$$

где  $S$  — степень насыщения процесса обработки;

$\Delta\sigma_{\text{пол}}$  — усилие, развиваемое в поверхностных слоях материала заготовки, в случае обработки в режиме полного насыщения;

$h_1$  — глубина наклёпанного слоя, мм.

Для дробеударного формообразования эффективной толщиной заготовок является толщина полотна от 1,5 до 15 мм.

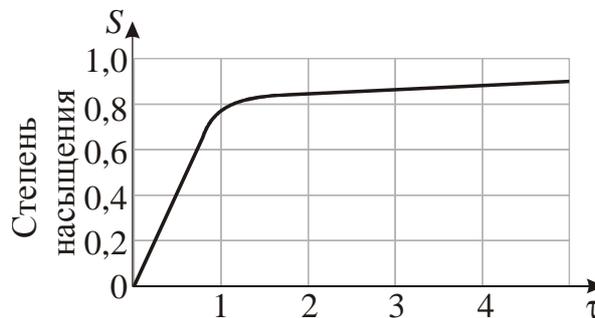


Рис. 3. Кривая зависимости степени насыщения от времени упрочнения

Степень насыщения является экспоненциальной функцией времени и интенсивности обработки (рис. 3):

$$S = 1 - \exp\left(-8,16 \frac{\tau}{\tau_{\text{пол}}}\right); \quad (14)$$

где  $\tau$  — время рабочей обработки, мин/см<sup>2</sup>;

$\tau_{\text{пол}}$  — время режима полного насыщения, мин/см<sup>2</sup>.

Режим полного насыщения при существующей интенсивности называют режимом обработки, при котором степень насыщения равна единице.

Время режима полного насыщения рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\tau_{\text{пол}} = m \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot q}; \quad (15)$$

где  $F$  — обрабатываемая площадь, мм<sup>2</sup>;

$d$  — диаметр отпечатка дроби, мм;

$q$  — удельная плотность потока дроби,  $\frac{1}{\text{мин} \cdot \text{см}^2}$ ;

$m$  — показатель насыщения.

$$q = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{6} \cdot F_{\text{пот}} \gamma}; \quad (16)$$

где  $Q$  — весовой расход в единицу времени, кг/мин;

$D$  — диаметр дроби, мм;

$\gamma$  — удельный вес материала дроби, г/см<sup>3</sup>;

$F_{\text{пот}}$  — площадь, покрываемая потоком дроби, мм<sup>2</sup>.

### Исследования остаточных напряжений при виброударной и дробеструйной обработке

Исследованиями влияния виброударного и пневмодробеструйного методов упрочнения различных деталей из сплавов Д16Т, В93-Т и стали 30ХГСНМА определялись оптимальные режимы упрочнения, качество и эффективность обработки. Для исследования изготавливались образцы в соответствии с ГОСТ и производственной инструкцией [10 — 11]. Образцы устанавливались в различных зонах обрабатываемых деталей для того, чтобы можно было установить степень равномерности упрочнения по всем поверхностям деталей. Контроль остаточных напряжений и область их залегания определялись методом Н. Н. Давиденкова, путем измерения величины прогиба образцов-свидетелей и измерению деформаций при непрерывном травлении на приборе ПИОН-2 (рис. 4).

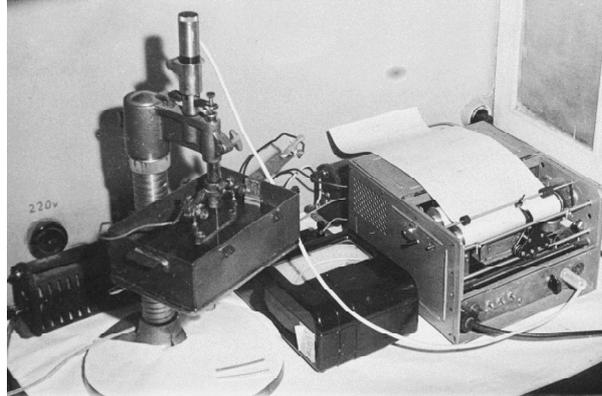


Рис. 4. Установка ПИОН-2

Кривую остаточных напряжений строили после дифференцирования кривой деформации в определенных точках по методике НИАТ [10]. Стрела прогиба измерялась на образцах-свидетелях индикатором с ценой деления 0,01 мм на контрольной плите. Основные остаточные напряжения рассчитывались по преобразованной формуле Н.Н. Давиденкова:

$$\sigma = \frac{4E(h-a)}{3b(2L-b)} \times K \frac{dF}{da}, \quad (17)$$

где  $K$  — масштабный коэффициент;

$E$  — статический модуль упругости материала, в кг/мм<sup>2</sup>;

$h$  — средняя толщина образца-свидетеля в мм;

$a$  — толщина стравленного слоя в мм;

$L$  и  $b$  — выбраны согласно схема крепления образца (рис. 5);

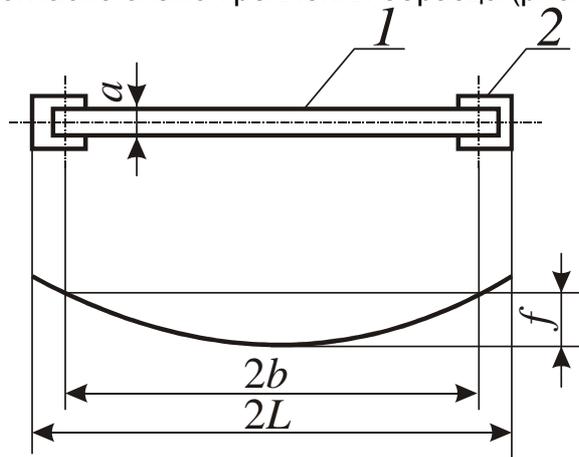


Рис. 5. Схема крепления образца при записи кривой деформации:

1 — образец свидетель; 2 — место крепления

$\frac{dF}{da}$  — тангенс угла наклона касательной, проведённой к кривой деформации в данной точке.

$$K = \frac{M_x}{M_y},$$

где  $M_x$  — масштабный коэффициент по оси  $X$ ;

$M_y$  — масштабный коэффициент по оси  $Y$ , равный увеличению прибора (половине увеличения самописца).

$$M_x = \frac{N_x}{\Delta h_1};$$

где  $N_x$  — проекция кривой деформации образца на оси  $X$ , в мкм,

$\Delta h_1$  — толщина удаляемого слоя образца, в мкм.

В таблице 1 представлены технологические режимы обработки и методы поверхностного пластического деформирования, на которых проводились исследования на материалах Д16-Т, В93-Т и 30ХГСНМА.

Таблица 1

Технологические режимы обработки ППД

Марка материала	Вибрационная обработка			Дробеструйная обработка		
	Частота вибрации $f$ , Гц	Амплитуда $A$ , мм	Диаметр шариков $d_{ш}$ , мм	Давление в сети $P$ , КПа	Скорость обработки $V$ , мм/мин	Диаметр шариков $d_{ш}$ , мм
Д16-Т	25	4	4	294 — 343	30 — 40	4
В93-Т	25	4	4	294 — 343	30 — 40	4
30ХГСНМА	25-30	4-5	3	392 — 441	40 — 50	3

В соответствии с экспериментальными данными были проведены расчеты остаточных напряжений по формуле (1) и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Величины замеров кривых деформаций и снимающих остаточных напряжений в образцах

Метод упрочнения	Марка материала	Величина прогиба, мм	Напряжения		Глубина залегания $\sigma_{max}$ , мкм	Максимальная глубина залегания остаточного напряжений $\sigma_{max}$ , мкм
			Максимальное $\sigma_{max}$ , кг/мм <sup>2</sup>	В поверхностном слое $\sigma_{пов}$ , кг/мм <sup>2</sup>		
Виброударный	Д16-Т	1,7	12 — 17	10 — 12	90 — 10	200 — 220
	В93-Т	1,8	18 — 25	18 — 10	60 — 90	220 — 280
	30ХГСНМА	2,3	25 — 30	15 — 18	90 — 120	300 — 360
Дробеструйный	Д16-Т	2,1	15 — 18	10 — 16	70 — 90	300 — 320
	В93-Т	2,2	18 — 22	10 — 12	100 — 120	310 — 330
	30ХГСНМА	2,9	30 — 35	12 — 18	110 — 180	340 — 360

По результатам экспериментальных данных была построена «кривая насыщенности» (см. рис. 3) при постоянном давлении  $P = 294$  КПа и изменении времени процесса упрочнения с 2 до 15 минут. Анализ «кривой насыщенности» позволяет

сделать вывод о том, что оптимальное время упрочнения необходимо выбирать в пределах 3 — 5 минут. При этом на образцах-свидетелях необходимо контролировать стрелу прогиба, как оптимальную, в пределах  $f_{\text{опт}} = 1,7 — 1,8$  мм для материала Д16-Т, а для стали 30ХГСНМА —  $f = 2,3 — 2,9$  мм.

В процессе обработки ППД шероховатость поверхности упрочнённых образцов по сравнению с неупрочнённой поверхностью снижается незначительно. Шероховатость зависит от марки обрабатываемого материала, от усилия удара и диаметра шариков, которые создают сплошное покрытие обрабатываемой поверхности отпечатками, а скругленная форма впадин создаёт благоприятный микрорельеф и существенно препятствует зарождению усталостных трещин.

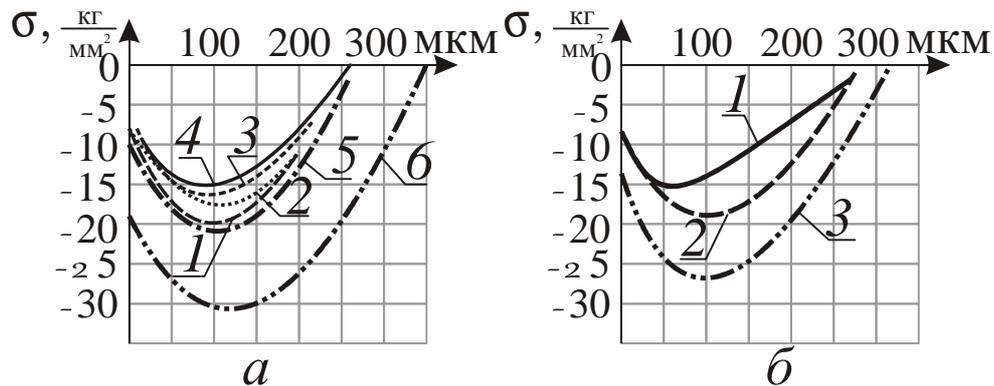


Рис. 6. Эпюры сжимающих остаточных напряжений при виброударной обработке:  
 а) время обработки 40 мин, 1 – 2 — верхняя поверхность детали, 3 – 4 — нижняя поверхность детали их Д16-Т, 5 — материал В93-Т, 6 — сталь 30ХГСНМА;  
 б) время упрочнения 20 мин, 1 — Д16-Т, 2 — В93-Т, 3 — 30ХГСНМА

Представленные на рис. 6 графики сжимающих остаточных напряжений позволяют сделать вывод о том, что при снижении времени виброударной обработки в два раза они снижаются, по глубине их залегания для сплавов Д16Т, В93-Т в 1,3-1,5 раза, и стали 30ХГСНМА в 1,5 раза. Экспериментально установлено что, вибрационным способом не гарантируется равномерность «наклёпа» на внешней и внутренней поверхности детали. А это может привести к её короблению, и в целом, к снижению долговечности. Поэтому при использовании этого метода упрочнения, необходимо предусматривать кинематику вибрационной установки, позволяющей вращение в бункере деталей или рабочего органа-наполнителя. Результаты замеров экспериментальных данных для дробеударной обработки представлены в табл. 2 и на рис. 7. Графики эпюр сжимающих остаточных напряжений указывает на то, что с увеличением времени «наклёпа» остаточные сжимающие напряжения по абсолютной величине растут. Так, с увеличением времени обработки с 5 до 15 минут рост сжимающих напряжений для сплавов Д16Т, В93-Т происходит в 1,4 раза, для стали 30ХГСНМА в 1,5 раза. Но при этом, необходимо отметить, что глубина залегания максимальных остаточных напряжений ( $\sigma_{\text{max}}$ ) уменьшается в 1,2 — 1,4 раза, как для алюминиевых сплавов Д16Т, В93-Т, так и для стали 30ХГСНМА. Это нежелательное явление, так как при этом происходит снижение предела выносливости.

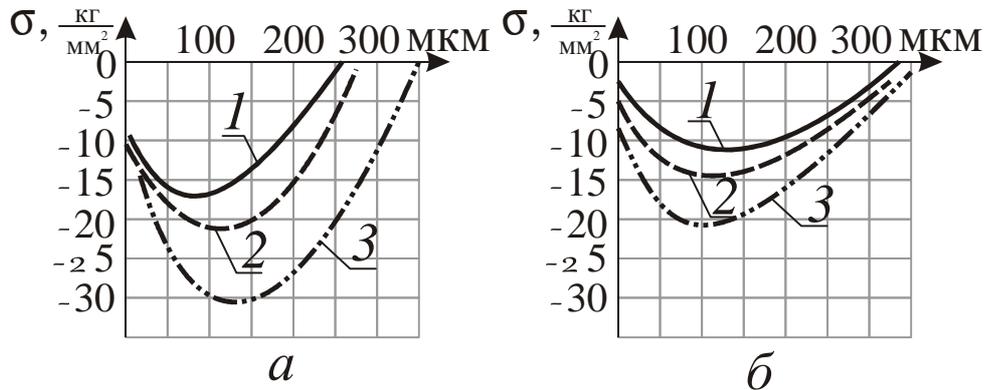


Рис. 7. Эпюры сжимающих остаточных напряжений при дробеструйной обработке:  
 1 — Д16-Т, 2 — В93-Т, 3 — 30ХГСНМА;  
 а) время упрочнения 15 мин; б) время упрочнения 5 мин

### Исследования Влияния ППД на долговечность

Образцы для испытаний изготавливались в соответствии с отраслевой инструкцией из материала, выбранного из таблицы 2, при продольном расположении волокон в образцах-свидетелях, что соответствует условиям работы деталей в процессе эксплуатации [10]. Испытания проводились на гидравлическом пульсаторе МУП-50, при симметричном цикле нагружения с постоянной амплитудой, частота нагружения составляла 1400 циклов в минуту. Образцы обрабатывались вместе с образцами-свидетелями, на которых замерялся прогиб и определялись остаточные напряжения. Исследования проводились не только на оптимальных режимах обработки, в каждой партии было по 6 — 8 образцов.

Результаты замеров усталостных испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3

### Результаты усталостных испытаний

	Вид обработки	Технологический режим обработки образцов	Количество циклов до разрушения (диапазон Pa)
I	Фрезерование	Поверхность после механической обработки	$0,43 \times 10^6$ — $0,21 \times 10^6$
II	Виброударная	$T = 40$ мин: $A = 3,5$ — $4$ мм $f = 25$ Гц $d = 3$ — $6$ мм	$0,43 \times 10^6$ — $2,32 \times 10^6$
		$T = 20$ мин: $A = 3,5$ — $4$ мм $f = 25$ Гц $d = 3$ — $6$ мм	$0,39 \times 10^6$ — $1,44 \times 10^6$
III	Пневмоударная	$P = 343$ кПа $d = 3$ мм $T = 4$ мин	$0,98 \times 10^6$ — $1,83 \times 10^6$

Сравнительная диаграмма усредненных показателей усталостных испытаний после различных видов обработки образцов на оптимальных режимах, материала Д16Т представлены на рис. 8.

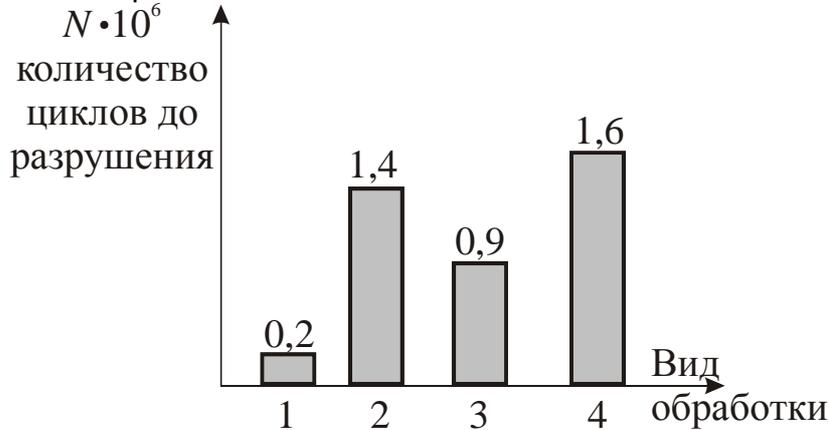


Рис. 8. Диаграмма усреднённых показателей усталостных испытаний образцов материала Д16Т при обработке:

1 — фрезерованием; 2 — виброударным способом в течение 40 мин;  
3 — виброударным способом в течение 20 мин; 4 — дробеструйной обработкой

Результаты сравнения видов обработки ППД (см. рис 6, 7) на образцах-свидетелях, расположенных в различных местах обрабатываемой поверхности детали, обеспечивает стабильное равнонапряжённое состояние сжимающих напряжений.

Анализ результатов экспериментальных данных по усталостным испытаниям дает основания сделать следующее заключение:

- с уменьшением времени виброударной обработки в 2 раза средняя долговечность (количество циклов до разрушения) снижается ~ в 1,3 раза;
- дробеструйный процесс обработки на оптимальных режимах обеспечивает увеличение усталостной долговечности до 8 раз по сравнению с исходной неупрочнённой поверхностью.

### Выводы

1. Виброударный метод обработки обеспечивает максимальную глубину сжимающих остаточных напряжений  $\sigma_{\max}$  (материал Д16Т до 20 кг/мм<sup>2</sup>), но незначительная вероятность их стабильности по всей плоскости обработки.

2. Пневмоударный метод обработки при меньшей величине остаточных напряжений обеспечивает более стабильную равнопрочность в приповерхностном слое детали, тем самым увеличивает надёжность изделия.

3. Пневматическое упрочнение значительно снижает технологический цикл упрочнения по сравнению с виброупрочнением.

### Список литературы

1. Поверхностный наклёп высокопрочных материалов: Сб. статей под редакцией С. Н. Кошкиной. — М.: ВИАМ, 1971. — 251 с.
2. Тейлор Эл. Доклад: Формовка и упрочнение поверхности дробеструйной обработкой. Научный семинар. — М.: НДТИ, 1975. — 35 с.
3. Саверин М. М. Дробеструйный наклёп. — М.: Машгиз, 1955. — 234 с.
4. Иванов С. И., Павлов В. Ф. и др. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на выносливость в условиях концентрации напряжений. Труды Куйбышевского авиационного института. — Куйбышев: КАИ, 1974. — Вып. 69. — С. 34 — 39.
5. Дрозд М. С. Глубина наклёпанного слоя при дробеструйной обработке деталей. — Сб. Вестник машиностроения, 1955. № 5. — С. 51 — 55.
6. Смирнов В. А. Аналитическое определение остаточных напряжений и деформации в процессе обработки деталей. — Известия ВУЗов. Машиностроение, 1977, № 1. — С. 150 — 155.
7. Руководство по технологичности самолётных конструкций. Изд. 4-е. Под общ. ред. П. Н. Беянина. — М.: НИАТ, 1987. — 387 с.
8. Поверхностное упрочнение при виброобработке РТМ-1306.
9. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов. — Л., М.: Машгиз, 1936. — 176 с.
10. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток турбин. Методические материалы. — М.: НИАТ, 1965. — 48 с.
11. РТМ-1171. Дробеударное формообразование обшивок одинарной кривизны. — М.: НИАТ, 1969. — 33 с.

Поступила в редакцию 20.03.2017

### **Ефективність застосування поверхневої деформації в авіабудуванні**

У статті розглядається процес поверхневої пластичної деформації алюмінієвих сплавів Д16-Т, В93-Т і стали 30ХГСНМА методами віброударної і дробеструйної обробки. Експериментальними даними доведено, що ефективнішим є метод дробеударної обробки, що забезпечує рівномірність стискаючих залишкових напружень в поверхневому шарі матеріалу, що забезпечує більш високу втомну міцність.

**Ключові слова:** поверхнева пластична деформація, віброзміцнення, дробеструйне зміцнення, стискаючі залишкові напруги, втомна міцність, поверхневий шар матеріалу, технологічний режим обробки.

## **Efficiency of Application of Superficial Deformation is in Aircraft Building**

The process of superficial flowage of aluminium alloys of Д16-Т is examined in the article, В93-Т and became the 30ХГСНМА methods of vibroshock and shot-blast treatment. It is well-proven experimental data, that more effective is a method of shot-shock treatment, providing equaldurability of squeezing remaining tensions in the superficial layer of material, that provides higher tireless durability.

**Keywords:** superficial flowage, workhardening, shoot peening, squeezing remaining tensions, tireless durability, superficial layer of material, technological mode of treatment.

### **Сведения об авторах:**

**Лупкин Борис Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского, Украина.

**Мамлюк Олег Владимирович** – доктор технических наук, профессор, директор Киевского авиационного техникума, Украина.

**Пинчук Алексей Александрович** – магистр, ГП «АНТОНОВ», Украина.