

Применение дробеударной обработки в авиационной промышленности

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Авиационный научно-технический комплекс «Антонов»*

Введение

В настоящее время широкое применение в авиастроении находит дробеударная обработка деталей планера современных самолётов в разнообразных технологических процессах их формообразования и упрочнения. Это связано с высокими требованиями к точностным параметрам поверхностей агрегатов, особенно, поверхностей крыльев, а, также к требованиям по ресурсу самолётов – до 80 тысяч часов налёта.

Сущность процесса заключается в том, что поверхность детали обрабатывается потоком быстролетящей дроби, которая при соударении с поверхностью образует в ней на глубине $h_{пл}$ пластическую остаточную деформацию. При односторонней дробеударной обработке, например, поверхности обшивки крыла самолёта, пластическая остаточная деформация создаёт в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения, которые приводят к изменению формы.

Следует заметить, что изменение формы деталей может иметь как положительное, так и отрицательное значение. При формообразовании деталей дробеударная обработка производится с такой интенсивностью и в таком порядке, чтобы поверхность детали приняла требуемый контур. Для упрочнения поверхности решается другая задача, в этом случае дробеударную обработку детали выполняют так, чтобы форма её не изменилась (не было коробления детали).

Метод дробеударной обработки является достаточно гибким и универсальным инструментом при создании технологических процессов формообразования и упрочнения широкого класса деталей – от небольших болтов до длинномерных монолитных панелей крыльев широкофюзеляжных транспортных самолётов длиной до 30...40 метров.

В данной статье поставлена задача анализа результатов наиболее интересных аналитических и экспериментальных работ в этой области, и представить своё видение в плане применения аналитических и экспериментальных зависимостей при расчётах технологических параметров деталей авиационной техники.

Обзор аналитических и экспериментальных работ в области дробеударной обработки

Изменение формы деталей при дробеударной обработке определяется их геометрическими параметрами и физико-механическими характеристиками материала, а также распределением в поверхностном слое остаточных напряжений, возникающих под воздействием потока дроби на обрабатываемую поверхность. Величина и характер распределения остаточных напряжений определяется характером деформированного состояния поверхностных слоев. Одним из основных вопросов при анализе действия дроби является определение напряженно-деформированного состояния материала по глубине поверхностного слоя.

Исследованию характера напряженно-деформированного состояния посвящён ряд трудов ученых [1, 3, 4, 5] и др. В этих работах проводились аналитические исследования напряженно-деформированного состояния материала при статическом внедрении в него сферического штампа (без учета упрочнения). Получены зависимости контактных напряжений и деформирующего усилия от глубины внедрения штампа. Эта же задача, с учетом упрочнения материала, рассматривалась в работах М. С. Дрозда [3], М. М. Саверина [1], В. А. Смирнова [4, 6] и других авторов, проведены теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев при динамическом внедрении в материал шариков различного размера.

При аналитическом рассмотрении данного вопроса, наиболее полное решение проведено в работах, проведенных М. С. Дроздом и В. А. Смирновым. Авторы исходят из следующих, достаточно хорошо подтверждаемых многочисленными экспериментами, предпосылок:

а) при достаточно длительной обработке поверхности заготовки дробью в её поверхностных слоях устанавливается однородное деформированное состояние, соответствующее осевой зоне под отпечатком отдельной дробинки;

б) величина и распределение остаточных напряжений целиком определяется установившимся в поверхностных слоях деформированным состоянием. М. С. Дроздом [3] получены следующие зависимости для расчета остаточных напряжений по толщине пластического слоя пластины, подвергнутой дробеударной обработке:

– в области вторичной пластической деформации ($z \leq h_2$)

$$\sigma_{ост,x} = -\sigma_T \quad (1)$$

– в области первичной пластической деформации ($h_2 \leq z \leq h_1$):

$$\sigma_{ост,x} = \sigma_T \left(1 - 2 \frac{h_2^3}{z^3} \right) \quad (2)$$

– в области упругих деформаций ($z \geq h_1$):

$$\sigma_{ост,x} = \sigma_T \frac{h_1^3}{z^3} \left(1 - 2 \frac{h_2^3}{h_1^3} \right), \quad (3)$$

где - h_1 и h_2 , соответственно, глубина области первичной и вторичной пластической деформации;

σ_T - предел текучести материала;

$\sigma_{ост,x}$ - остаточные напряжения в пластически деформированном слое.

В этой работе установлено, что область вторичной пластической деформации распространяется примерно на одну треть толщины пластически деформированного слоя. Сжатым является не весь слой материала, который при обработке дробью оказался пластически деформированным, а только 0,69 его глубины.

В. А. Смирновым [6] предложены следующие зависимости величины остаточных напряжений от остаточных деформаций поверхностных слоев:

– в области упругих деформаций:

$$\sigma_{ост,x} = -\mu E_{II} \varepsilon_x \quad (4)$$

– в области пластических деформаций

$$\sigma_{ост,x} = -\mu K_{II} \varepsilon_x^n \quad (5)$$

где E_{II} , K_{II} – приведенные модули, оцениваемые через соответствующие линейные модули соотношениями:

$$E_n = \frac{E}{1-\mu^2} \text{ и } K_n = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{(1+n)} E. \quad (6)$$

Распределение остаточных деформаций сжатия по толщине пластически деформированного слоя рекомендуется определять по следующим формулам в зависимости от отношения диаметра отпечатка дроби (D) к её диаметру (d) и от угла (α) обдувки поверхности дробью:

– при $\frac{d}{D} \leq 0,1$ $\varepsilon_x = -2 \frac{h}{h_{пл}} \left(1 - \frac{z}{h_{пл}}\right)$ (7)

– при $\frac{d}{D} > 0,1$ $\alpha \leq 45^\circ$ $\varepsilon_x = -c \frac{h}{h_{пл}} e^{-c \frac{z}{h_{пл}}}$ (8)

– при $\frac{d}{D} > 0,1$ $\alpha \geq 45^\circ$ $\varepsilon_x = -Ae^{-C \left(\frac{z}{h_{пл}} - \frac{z_{max}}{h_{пл}}\right)}$ (9)

Для расчета напряжений по формулам (1 - 3) и (4 - 5) необходимо определить диаметр и глубину остаточного отпечатка, а затем глубину поверхностного пластически деформированного слоя.

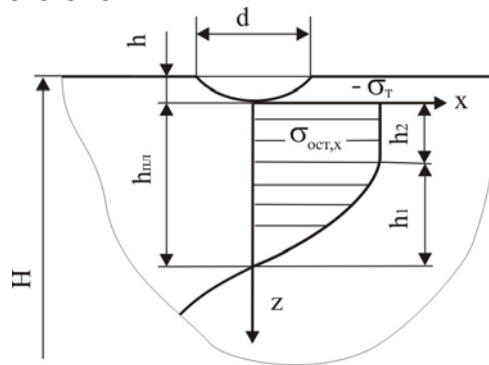


Рис. 1. Эпюра остаточных деформаций по толщине пластически деформированного слоя под отпечатком дроби

Зная закон распределения остаточных напряжений по глубине пластически деформированного слоя, определяют усилия, деформирующие заготовку, их значения находят интегрированием эпюры остаточных напряжений по глубине пластически деформированного слоя:

– величина растягивающей силы на единицу параметра

$$P = \int_{h_{пл}} \sigma_x dz; \quad (10)$$

– величина изгибающего момента на единицу параметра

$$M = \int_{h_{пл}} \sigma_x \left(\frac{H}{2} - z\right) dz; \quad (11)$$

где H – толщина пластины.

Расчитанные внутренние усилия играют роль внешних нагрузок для пластически недеформированной части сечения заготовки. Общий случай пластического деформирования пластин под действием сил и моментов рассмотрен А. А. Ильюшиным. Однако полученные уравнения равновесия весьма сложны и содержат неизвестных больше, чем имеется уравнений, поэтому решение их с использова-

нием уравнений связи и совместности деформаций возможно лишь для некоторых частных случаев.

Вопросу определения характера формоизменения обработанной дробью пластины от действующих на нее усилий посвящены работы М. С. Дрозда [3], М. М. Саверина [1], В. А. Смирнова [6], Ю.В. Шевнюка [7] и др.

В случае равномерной обработки дробью плоской пластинки М. М. Савериним [1] для расчета радиуса кривизны использовано уравнение для чистого изгиба пластины, деформируемой внешним равномерно распределенным моментом.

$$R_{ост} = \frac{E(H - h_{пл})^3}{12(1 - \mu)} \frac{1}{M} \quad (12)$$

где E - модуль, упругости материала;

$R_{ост}$ - остаточная кривизна;

μ - коэффициент Пуассона.

При расчете радиуса кривизны пластины с различной жесткостью в направлении осей XU используют формулу, учитывающую приведенную жесткость заготовки:

$$R_{ост} = \frac{D_{пр}}{M_{изг}}, \quad (13)$$

где:

$$D_{пр} = \frac{D_x D_y (1 - \mu^2)}{D_y - \mu D_x} \quad \text{– приведенная цилиндрическая жесткость;}$$

$$D_x = \frac{EH_x^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad \text{– цилиндрическая жесткость пластины в направлении } XU, \text{ соответственно.}$$

$$D_y = \frac{EH_y^3}{12(1 - \mu^2)}$$

Изгибающий момент определяется с учетом степени насыщения обрабатываемой поверхности отпечатками

$$M_{изг} = s P_{пл} \frac{H - h_{пл}}{2}, \quad (14)$$

где s – степень насыщения процесса обработки;

$P_{пл}$ – величина усилия, развиваемого при обработке дробью, в режиме полного насыщения.

Исходя из опыта проектирования монолитных панелей (обшивок) крыла, подлежащих формообразованию дробью, очень важно иметь простые формулы для оценки технологических параметров, например, остаточного радиуса кривизны после дробеударной обработки. Поэтому мы рекомендуем в инженерных расчётах использовать упрощённую методику для остаточного радиуса, основанную на следующих допущениях:

а) в поверхностном пластически деформированном слое остаточные напряжения равны напряжениям текучести материала $\sigma_{x,ост} = -\sigma_T$;

б) усилия, развиваемые в пластическом слое, рассматриваются как внешние;

с) цилиндрическая жесткость пластины толщиной H примерно равна - $D \approx \frac{EH_x^3}{12}$.

На рис. 1. представлены эпюры напряжений в плоскости ZX пластины толщиной H . под воздействием напряжений σ_T пластина.

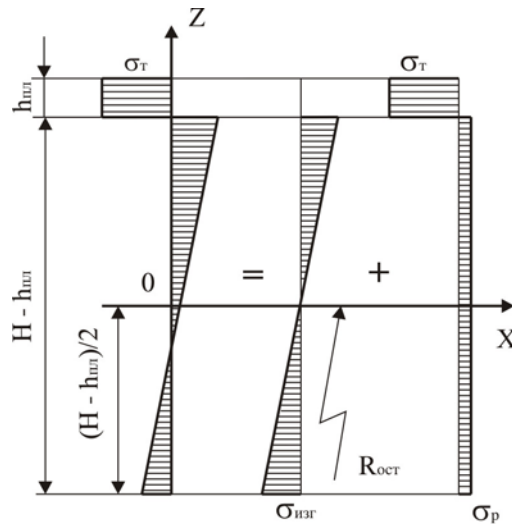


Рис. 2. Эпюры напряжений в пластине

Изгибающий момент на единицу ширины пластины (см. рис.1), возникающий в поверхностном пластически деформированном слое, и максимально возможный остаточный радиус, соответственно, равны

$$M_{изг} = s\sigma_T h_{пл} \frac{H}{2}, \quad (15)$$

$$R_{ост} = \frac{D}{M_{изг}} = \frac{1}{6} \frac{EH^2}{s\sigma_T \left(1 - \frac{h_{пл}}{H}\right)}. \quad (16)$$

Заметим, что при дробеударной обработке поверхности ребристых монолитных панелей, изгиб происходит вдоль направления рёбер жесткости (плоскость изгиба перпендикулярна рёбрам жесткости). Это связано с тем, что изгибная жёсткость панели поперек рёбер во много раз больше изгибной жесткости панели вдоль рёбер.

Для определения режимов дробеударной обработки, обеспечивающих заданную кривизну монолитных панелей, В.Н. Крысиным предложены эмпирические зависимости прогиба панели как функции диаметра сопла Φ и диаметра жиклера $\phi_{ж}$ дробеструйного аппарата, положением питательного клапана $S_{п.к.}$, расстояния сопла от поверхности полотна L , жесткости панели J , давления воздуха в аппарате P , времени обработки t , диаметра d_d и количества дроби в бункере Q :

$$f_o = f(L, \Phi, \phi_{ж}, S_{п.к.}, J, \mu, P, t, d_d, Q, K). \quad (17)$$

В. А. Смирновым [6] исследован процесс дробеударного формообразования панелей с учетом формы изгиба, а, следовательно, и сложности напряженного состояния. Им получены зависимости кривизны изгиба и силовых факторов процесса, по которым графоаналитическим методом можно определить относительную кривизну нейтрального слоя обработанной дробью панели. В работе [4] предложена следующая зависимость для выбора режимов обработки, обеспечивающих заданную кривизну панели:

$$\frac{d}{D} = \left[1 + B_y (n_y - 1)^{n_y}\right] \cdot \left[\frac{2 \rho v^2 \frac{n_d + 2}{H_{дин}}}{3 g}\right]^{\frac{1}{n_d + 2}} \quad (18)$$

где d, D – диаметры отпечатка и дроби;
 $H_{дин}$ – истинная динамическая твердость;

n_d – показатель динамического упрочнения;
 B_y, m_y – постоянные, характеризующие сопротивление материала повторному нагружению;

n_y – количество ударов дроби, приходящееся на ранее обработанные участки;

ρ – плотность материала;

g – ускорение силы тяжести;

V – скорость дроби.

Для n_y предложена расчетная формула:

$$n_y = \sum_L q_i \frac{\pi d^2 L_i}{4 S} \quad (19)$$

где: q_i – удельная плотность дробеструйного потока;

L_i – ширина дробеструйного потока в направлении подачи;

v – скорость перемещения сопла относительно обрабатываемой поверхности.

Для определения режимов обработки (диаметра дроби, давления воздуха и скорости перемещения сопла) построены номограммы.

Использование полученных зависимостей при практическом применении дробеударного формообразования крупногабаритных панелей довольно затруднительно. Определение режимов обработки должно проводиться с учетом специфики каждой применяемой установки, управляемых параметров и т.д. Например, у многих типов установок не удастся разделить управление расходом и скоростью дроби, так как увеличение скорости дроби увеличивает и её расход при неизменном положении расходного клапана. Поэтому, несмотря на полученные зависимости, процесс формообразования ведут, как рекомендуют, методом проб с постоянным контролем кривизны панелей шаблонами. Формообразование монолитных панелей, как правило, рассчитано на высокую квалификацию оператора и ручную обработку, поэтому необходимо применять высокопроизводительное оборудование с ЧПУ.

Исходя из накопленного производственного опыта, одним из эффективных способов интенсификации дробеударного формообразования является создание предварительного напряженного состояния детали. Формообразование в напряженном состоянии позволяет повысить стабильность процесса, снизить интенсивность обработки, улучшить качество поверхности, расширить пределы толщин формируемых панелей, производить формообразование панелей сложной формы без резкого изменения интенсивности обработки. Исследования обработки дробью пластин в напряженном состоянии проводились, в основном, при наклепе рессорных листов [8]. Исследования доказали, что наклеп в напряженном состоянии повышает долговечность рессор, в 2,5 - 4 раза по сравнению с наклепом в свободном состоянии, в 1,8 раза повышается коррозионная усталость, при этом снижается вес рессор на 23-24 % и трудоемкость их изготовления на 23-45% [7].

Оборудование для формообразования и упрочнения деталей авиационной техники

Для выполнения процессов формообразования и упрочнения дробью применяются дробеструйные и дробеметные установки. Установки различаются источником кинетической энергии: струя газа или лопасти быстро вращающегося ротора.

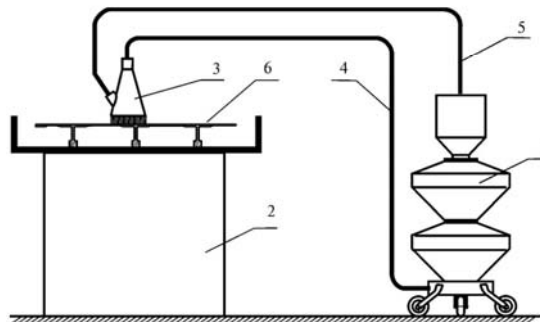
Для общего упрочнения деталей авиационной техники, как правило, применяется стационарная установка типа ДОК-1, представляющая собой закрытую камеру. Внутри камеры находится оператор в защитном скафандре, который вруч-

ную упрочняет поверхность деталей по специальным режимам. В конструкции камеры предусмотрена щель, что позволяет производить обработку деталей, практически неограниченной длины.

Установка БДУ-Э2М (см. Рис. 3.) применяется как для упрочнения, так и формообразования монолитных панелей. Она работает с замкнутой циркуляцией дроби, смонтирована на тележке, что позволяет перемещаться вдоль обрабатываемой детали.



а)



б)

Рис. 3. а) - формообразование монолитной панели крыла на дробеударной установке БДУ-Э2М;

б) - принципиальная схема установки;

- 1 - общий вид установки; 2 - рабочий стол;
- 3 - дробеударная головка; 4 - рукав подачи дроби;
- 5 - рукав для отсоса дроби; 6 - панель.

Деформирующим элементом в обеих установках является стальная дробь диаметром 0,6 – 1,2 мм.

Для упрочнения и формообразования также применяется установка с ЧПУ УДП-2-1,5 (см. Рис. 4.), которая представляет собой щелевую камеру, внутри которой расположены, как правило, несколько дробеметных головок (с одной или с обеих сторон). Характерной особенностью установки является возможность совмещения процессов упрочнения и формообразования панелей в программном режиме.

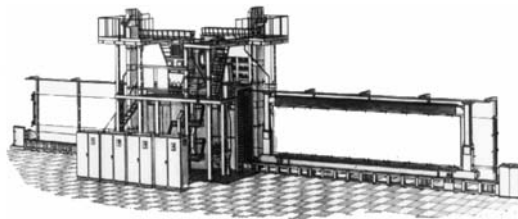


Рис. 4. Установка с ЧПУ для формообразования и упрочнения монолитных панелей УДП-2-1,5.

Для формообразования монолитных панелей повышенной жёсткости двойной кривизны применяется установка УДФ-2 (см. Рис. 5.), с формующей дробью диаметром 3 – 4 мм.

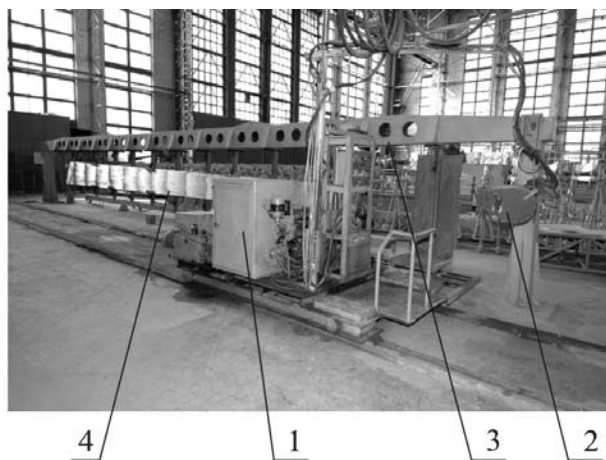


Рис. 5. Установка для формообразования монолитных панелей дробеударной обработкой УДФ-2:
1 - подвижный агрегат; 2 - дробеметная головка;
3 - рама; 4 - монолитная панель.

Из всех методов упрочняющей обработки дробью, дробеметное оборудование наиболее производительное и экономичное. Однако дробеструйный метод более универсален, позволяет производить обработку локальных зон.

Специфика упрочнения местным пневмодинамическим наклепом (ПДН), обусловленная созданием локальных остаточных напряжений, определяет создание специальных камер. На Рис. 6 показано упрочнение локальных зон законцовки монолитной панели.

Местная камера создает ограниченный объем, в котором хаотически движется дробь под воздействием сжатого воздуха 3-5 кПа. Отражаясь от стенок камеры, дробь соударяется с обрабатываемой поверхностью.



Рис. 6. Упрочнение местным ПДН радиусной зоны монолитной панели крыла

Процесс местного ПДН довольно трудоемкий и малопроизводительный, однако в ряде случаев позволяет снизить затраты, когда есть необходимость упрочнения небольшой критической зоны, а так же является незаменимым при сборке или в процессе проведения ремонтных работ. В качестве рабочей среды используется стальная и алюминиевая дробь диаметром 3 - 4 мм.

Выводы

1. Анализ аналитических и экспериментальных работ в области дробеударной обработки показывает, что методы расчёта технологических параметров очень громоздкие.
2. Для расчёта параметров упрочнения целесообразно использовать методы с использованием опытных образцов (пластин Алмена).
3. Рекомендована формула для оценки остаточного радиуса кривизны при максимальном изгибающем моменте от сил, возникающих при дробеударной обработке пластин, ребристых монолитных панелей.
4. Формообразование и упрочнение монолитных панелей целесообразно выполнять на оборудовании с ЧПУ.

Список литературы

1. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп. Теоретические основы и практика применения. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.
2. Димитренко О. В., Мякотин А. Д. Анализ способов изменения остаточных напряжений в поверхностных слоях пластин. – «Авиационная промышленность», 1972, №9, с. 51-54.
3. Дрозд М. С. Глубина наклепанного слоя при дробеструйной обработке деталей – сб. «Вестник машиностроения», 1955, п.5, с.48-50.
4. Смирнов В. А. Аналитическое определение остаточных напряжений и деформаций в процессе обработки деталей. – «Известия ВУЗов. Машиностроение», 1977, №1, с. 150-155.
5. Соколовский В. В. Теория пластичности. – М.: Высшая школа, 1969, – 608 с.
6. Смирнов В. А. , Лысов М. И. Определение параметров процесса дробеударного формообразования. – В сб.: «Труды Казанского авиационного института», 1973, №159, с. 17-19.
7. Карасев Н. А. Наклеп дробью деталей, находящихся в напряженном состоянии. М., 1955, – 18с.