

Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Государственное предприятие «АНТОНОВ»*

Рассмотрен процесс поверхностного пластического деформирования алюминиевых сплавов Д-16Т, В93-Т и стали 30ХГСНМА методами виброударной дробеструйной обработки. Экспериментальными данными доказано, что более эффективным является метод дробеструйной обработки, обеспечивающей равнопрочность сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое материала, что приводит к более высокой усталостной прочности.

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

На эксплуатационные характеристики детали, кроме оговоренных чертежом марки материала, его твердости, точности, шероховатости обработанных поверхностей, существенное влияние оказывают методы и режимы ее получения. Поверхности с одинаковой точностью и шероховатостью могут иметь различную степень наклёпа, неодинаковый характер и величину остаточных напряжений, кроме того, может быть нарушена цельность поверхности вследствие микротрещин, задиров и т. д. Основные эксплуатационные свойства поверхности, её микро- и макрогеометрия, микротвердость, напряженное состояние, химический состав, структура тончайших наружных слоёв металла формируются на протяжении всего периода обработки деталей. Следовательно, при механической, термической или другой физико-технической обработке деталей существует технологически-эксплуатационная наследственность [1, 2, 3].

Наиболее эффективная и надёжная мера повышения усталостной долговечности элементов конструкций – уменьшение уровня действующих напряжений в зоне концентраторов напряжений различными технологическими методами [4, 5].

Одним из эффективных технологических методов, обеспечивающих повышение надежности и усталостной 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 структуры, препятствующей зарождению и развитию усталостных трещин. Максимальной усталостной долговечности соответствует определенный уровень поверхностной твердости и остаточных напряжений, причём максимум этих свойств достигается в определённом диапазоне значений интенсивности упрочнения [6, 7].

Рассмотрим влияние операций поверхностного упрочнения на ослабление воздействия отрицательных факторов технологической наследственности.

Основной эффект заключается в том, что значительное количество микротрещин, находящихся в поверхностном слое металла, от предыдущих технологических операций в результате высоких удельных усилий и пластической деформации смыкаются, и поверхность становится более цельной. Помимо того, по-

верхностный наклёп выравнивает физико-механические свойства различных участков поверхности, устраняя повышенные напряжения, возникающие на границах участков с различной структурой и микротвёрдостью. На этих участках во время эксплуатации детали могут образовываться микротрещины.

Поверхностный наклёп при осуществлении упрочняющих операций выравнивает структурные неоднородности, устраняя концентраторы напряжений. Это возникает в результате того, что при обработке мягких структур наклёп происходит интенсивнее, чем твёрдых, поэтому их микротвёрдость выравнивается. Кроме того, 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 [8, 9].

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВИБРОУДАРНОЙ И ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Исследование влияния виброударного и пневмодробеструйного методов упрочнения различных деталей из сплавов Д-16Т, В93-Т и стали 30ХГСНМА позволило определить оптимальные режимы упрочнения и повысить эффективность обработки. Образцы устанавливали 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 определили методом Н. Н. Давиденкова [10, 11], путём измерения величины прогиба образцов-свидетелей и измерения деформаций при непрерывном травлении на приборе ПИОН-2 (рис. 1, 2).

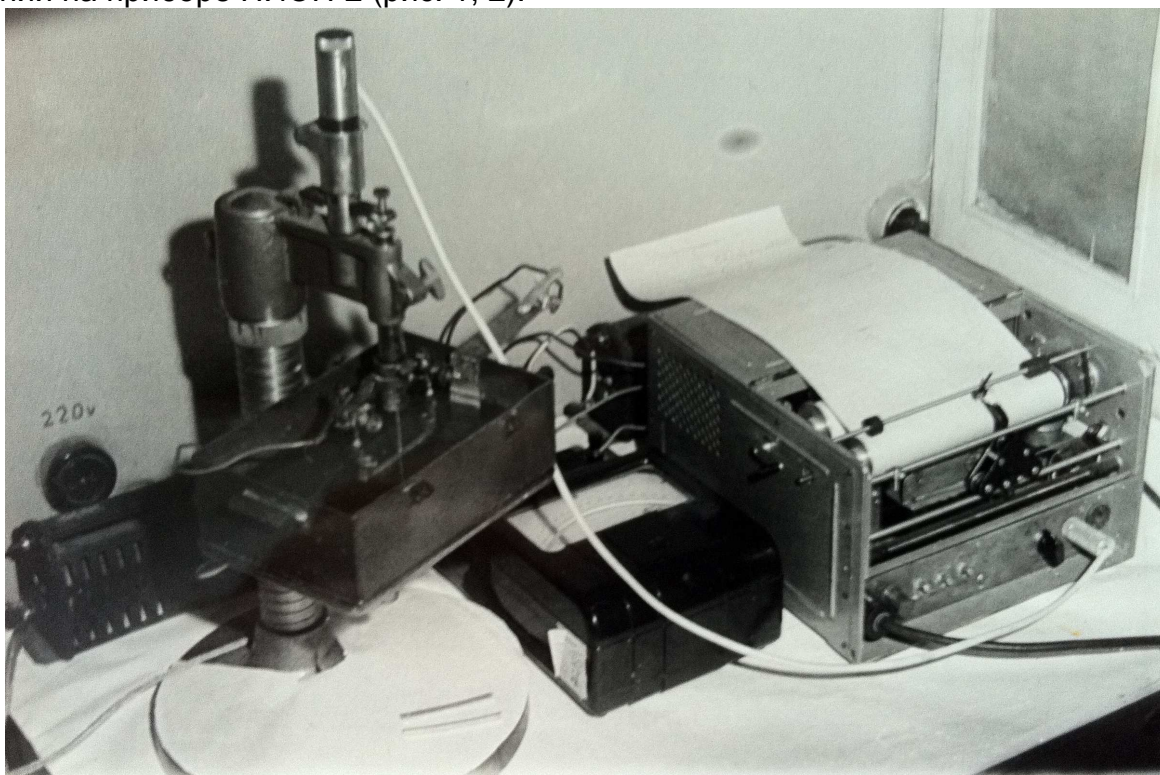


Рис. 1. Прибор для определения остаточных напряжений «Пион-2» с самописцем БВ-662

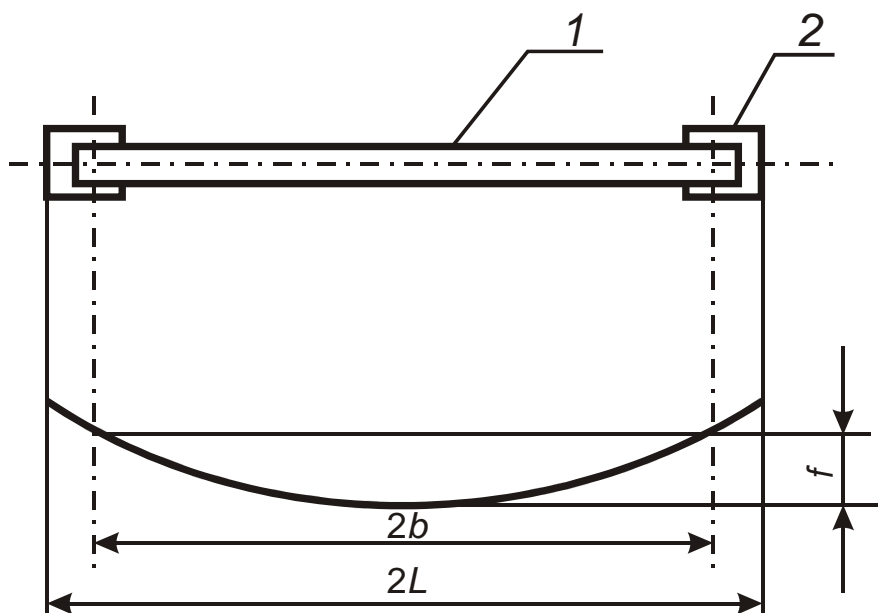


Рис. 2. Схема крепления образца при записи кривой деформации

Кривую остаточных напряжений строили после дифференцирования кривой деформации в определённых точках по методике НИАТ [11]. Стрелу прогиба f измеряли на образцах-свидетелях индикатором с ценой деления 0,01 мм на контрольной плите.

Основные остаточные напряжения рассчитывали по преобразованной формуле Н. Н. Давиденкова

$$\sigma = \frac{4E(h-a)}{3b(2L-b)} \cdot K \frac{dF}{da}, \quad (1)$$

де K — масштабный коэффициент;

E — статический модуль упругости материала, кг/мм²;

h — средняя толщина образца-свидетеля, мм;

a — толщина стравленного слоя, мм;

L и b — выбраны согласно схеме крепления образца (см. рис. 2);

$\frac{dF}{da}$ — тангенс угла наклона касательной, проведенной 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);

$M_x = \frac{N_x}{\Delta d}$, где N_x — проекция кривой деформации образца на оси X , мкм; Δd — толщина удаляемого слоя образца, мкм.

Технологические режимы обработки методами поверхностного пластического деформирования, при которых проводили исследования на материалах Д-16Т, В93-Т и стали 30ХГСНМА, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические режимы обработки ППД

Марка материала	Вибрационная обработка			Дробеструйная обработка		
	Частота вибрации f , Гц	Амплитуда A , мм	Диаметр dm , мм	Давление в сети P , кг/см ²	Скорость обработки V , мм/мин	Диаметр шариков dm , мм
Д-16Т	25	4	4	3...3,5	30...40	4
В93-Т	25	4	4	3...3,5	30...40	4
30ХГСНМА	25...30	4...5	3	4...4,5	40..50	3

Результаты замера кривых деформаций образцов и расчёта остаточных напряжений по формуле (1) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина кривых деформаций и остаточных напряжений в поверхностном слое образцов

Метод упрочнения	Марка материала образца	Средняя величина прогиба f мм	Напряжения		Глубина залегания σ_{\max} , мкм	Максимальная глубина залегания ост. напряжения σ , мкм
			Максимальное σ_{\max} , кг/мм ²	В поверхностном слое $\sigma_{\text{пов}}$, кг/мм ²		
Виброударный	Д-16Т	1,7	12...17	10...12	90...100	200...220
	В93-Т	1,8	18...25	8...10	60...90	220...280
	30ХГСНМА	2,3	25...30	15...18	90...120	300...360
Дробеструйный	Д-16Т	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

Анализ данных, представленных в табл. 2 и показан на рис. 3, указывает на то, что в процессе виброударной обработки при уменьшении времени обработки с 40 до 20 минут снижаются сжимающие остаточные напряжения в 1,5 раза, и снижается глубина их залегания в поверхностном слое для сплавов Д-16Т и В93-Т в 1,3—1,5 раза, для стали 30ХГСНМА — в 1,5 раза. Кроме того, экспериментально доказано, что этот метод не может гарантировать равномерность «наклёпа» на внешней и внутренней поверхности детали, что может привести к ее короблению и в целом к снижению долговечности при усталостных испытаниях.

К недостаткам виброударной обработки следует отнести:

- не обеспечивается равномерность упрочнения;
- для различных типоразмеров деталей необходимо иметь свой контейнер.

Анализ данных для дробеударной обработки представлен в табл. 2 и показан на рис. 4. Из графика эпюр остаточных напряжений видно, что с увеличением времени «наклёпа» остаточные сжимающие напряжения по абсолютной величине растут: для алюминиевых сплавов Д-16Т и В93-Т в 1,5 раза, для стали 30ХГСНМА — в 1,4 раза при увеличении времени обработки с 5 до 15 минут. Но при этом необходимо отметить, что глубина залегания максимальных остаточных напряжений

(σ_{max}) уменьшается в 1,3 — 1,5 раза, как для алюминиевых сплавов Д-16Т и В93-Т, так и для стали 30ХГСНМА. Это нежелательное явление, так как при этом происходит смещение предела выносливости.

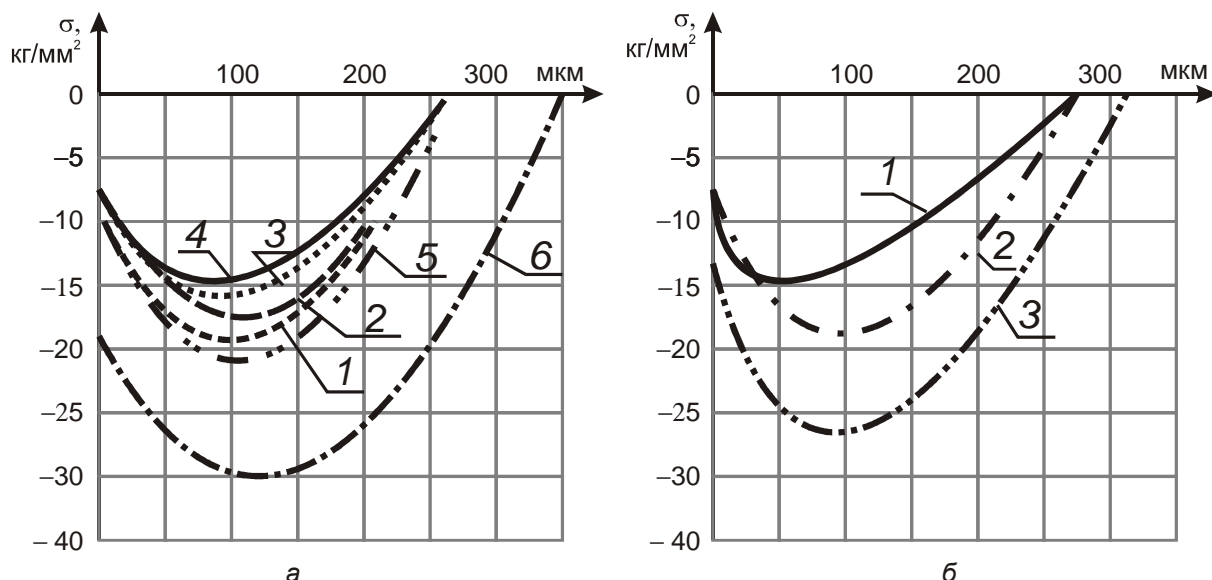


Рис. 3. График эпюр остаточных сжимающих напряжений после виброударной обработки: а — время упрочнения 40 мин; 1, 2 — верхняя сторона детали из Д-16Т; 3, 4 — нижняя сторона детали из Д-16Т; 5 — материал В93-Т; 6 — сталь 30ХГСНМА; б — время упрочнения 20 мин; 1 — Д-16Т; 2 — В93-Т; 3 — 30ХГСНМА

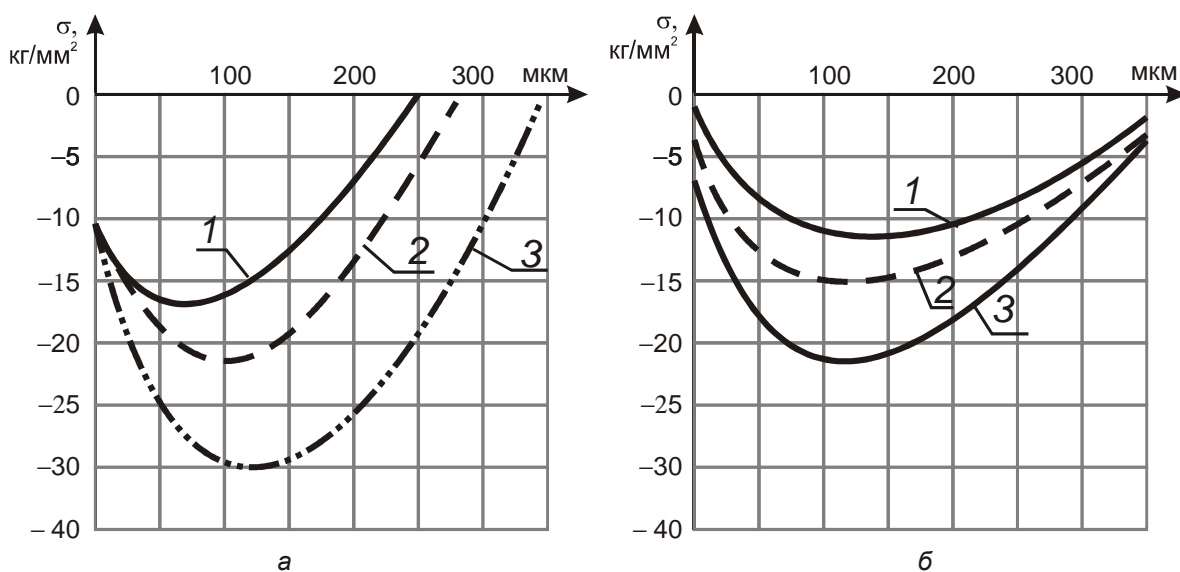


Рис. 4. График эпюр остаточных сжимающих напряжений после дробеструйной обработки:
а — время упрочнения 10 мин; б — время упрочнения 4 мин;
1 — Д-16Т; 2 — В93-Т; 3 — 30ХГСНМА

По результатам экспериментальных данных была построена «кривая насыщения» (рис. 5) при постоянном давлении $P = 3 \text{ кг/см}^2$ и изменении времени процесса упрочнения с 2 до 15 минут. Анализ «кривой насыщения» позволяет сделать вывод о том, что оптимальное время упрочнения следует выбирать в пре-

пределах 3 — 5 минут, а на образцах-свидетелях необходимо контролировать стрелу прогиба, как оптимальную, в пределах $f_{\text{опт.}} = 1,7 — 1,8$ мм для материалов Д16-Т, для стали 30ХГСНМА — $f = 2,3 — 2,9$ мм.

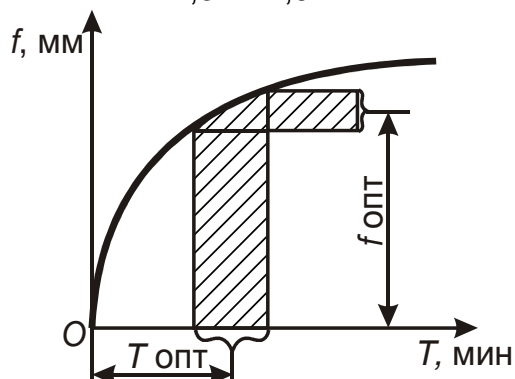


Рис. 5. График зависимости прогиба образца f от времени упрочнения, «кривая насыщения»

При этом чистота поверхностей упрочнённых образцов по сравнению с неупрочнённой поверхностью снижается незначительно. Чистота зависит от марки обрабатываемого материала, а также от силы удара и диаметра шариков, которые создают сплошное покрытие отпечатков. Скруглённая форма впадин создаёт благоприятный микрорельеф и существенно препятствует зарождению усталостных трещин.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОСЛЕ ППД

Исследования проводили на режимах и оборудовании, которые использовали при исследовании остаточных напряжений (см. табл. 2), образцы изготавливали из материала Д16-Т при условии продольного расположения волокон в образцах-свидетелях, что соответствует условиям работы деталей в процессе эксплуатации. Испытания проводили на гидравлическом пульсаторе МУП-50, при симметричном цикле нагружения с постоянной амплитудой, частота нагружения составляла 1400 циклов в минуту. Образцы обрабатывали вместе с образцами-свидетелями, на которых измеряли прогиб и определялись остаточные напряжения. Исследования выполняли не только на оптимальных режимах обработки, в каждой партии было по 8 — 10 образцов.

Результаты усталостных исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний после ППД

Вид обработки	Режим обработки	Количество циклов до разрушения (диапазон рассеивания)
Неупрочнённая	Фрезерование	от $0,43 \cdot 10^6$ до $0,21 \cdot 10^6$
Виброударная	$T = 40$ мин	от $0,43 \cdot 10^6$ до $2,31 \cdot 10^6$
	$T = 20$ мин	от $0,39 \cdot 10^6$ до $1,44 \cdot 10^6$
Пневмодробеструйная	$P = 3$ кг/мм ² $d = 3$ мм $T = 4$ мин	от $0,98 \cdot 10^6$ до $1,83 \cdot 10^6$

На рис. 6 на основе экспериментальных данных показаны сравнительные диаграммы усталостных испытаний после различных видов поверхностной обработки. По результатам экспериментальных данных максимальную усталостную прочность (≈ 8 раз) обеспечивает метод дробеструйной обработки, несмотря на то, что остаточные напряжения у него почти в 1,8 раза ниже, чем при виброударной обработке (см. рис. 3, 4). Исследование образцов-свидетелей, расположенных в различных местах обрабатываемой поверхности детали, свидетельствует о том, что дробеструйная обработка обеспечивает более стабильное равнонапряженное состояние сжимающих напряжений.



Рис. 6. Диаграмма усреднённых показателей усталостных испытаний Д16-Т:
1 — фрезерование; 2a — виброударная обработка, $T = 40$ мин;
2б — виброударная обработка, $T = 20$ мин; 3 — дробеструйная обработка

На основании анализа результатов экспериментальных данных по усталостным испытаниям можно сделать следующие заключения:

- с уменьшением времени виброударной обработки до 20 мин средняя долговечность (количество циклов до разрушения) снижается \approx в 1,5 раза;
- дробеструйная обработка увеличивает усталостную долговечность в 8 раз по сравнению с неупрочнённой поверхностью, причём у неё значительно меньший (в 2 раза) диапазон рассеивания до разрушения и значительно сокращается технологическое время на процессе упрочнения.

Экспериментальными данными установлено, что отклонение от оптимальных режимов упрочнения снижает уровень долговечности в 2 — 3 раза.

Выводы

1. Методы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием стабильно дают возможность повысить надёжность и долговечность.
2. Метод виброударной обработки обеспечивает максимальную глубину залегания снижающих остаточных напряжений σ_{\max} (материал Д16-Т до 20 кг/мм²), но не гарантирует их стабильности по всей плоскости обработки, что отражается на уровне долговечности детали.

3. Метод пневмоударной обработки при меньшей величине остаточных напряжений приводит к более стабильной равнопрочности в приповерхностном слое детали, тем самым увеличивая надёжность изделия.

4. Пневмодинамическое упрочнение значительно снижает технологическое время упрочнения (в 10 раз) по сравнению с виброупрочнением.

5. Рекомендуемые режимы обработки:

Виброударная обработка:

- амплитуда колебаний — $A = 3,5 \dots 4$ мм;
- частота колебаний — $f = 25$ Гц;
- диаметр шариков — $d_{ш} = 4 \dots 5$ мм;
- время упрочнения — $T = 30 \dots 40$ мин.

Дробеструйная обработка:

- давление воздуха в сети — $P = 3,5$ кг/см²;
- диаметр шариков — $d_{ш} = 3$ мм;
- время упрочнения — 4 мин.

Список литературы

1. Поверхностный наклёп высокопрочных материалов [Текст]: сб. ст. / под ред. С. Н. Кошкиной. — М.: ВИАМ, 1971. — 251 с.
2. Тейлор, Эл. Формовка и упрочнения поверхности дробеструйной обработкой. [Текст] / Эл. Тейлор. — М.: НДТИ, 1975. — С. 35.
3. Саверин, М. М. Дробеструйный наклёп [Текст] / М. М. Саверин. — М.: Машгиз, 1955. — 234 с.
4. Иванов, С. Н. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на выносливость в условиях концентрации напряжений [Текст] / С. Н. Иванов, В. Ф. Павлов и др. // Труды Куйбышевского авиационного института. — Куйбышев: КАИ, 1974. — Вып. 69. — С. 34 — 39.
5. Дрозд, М. С. Глубина наклёпанного слоя при дробеструйной обработке деталей [Текст] / М. С. Дрозд. — Сб. Вестник машиностроения, — 1955. — № 5. — С. 51 — 55.
6. Смирнов, В. А. Аналитическое определение остаточных напряжений и деформаций в процессе обработки деталей [Текст] / В. А. Смирнов. — //Известия вузов. Машиностроение, — 1977. — № 1. — С. 150 — 155.
7. Руководство по технологичности самолётных конструкций [Текст] / год общ. ред. П. Н. Беянина. — 4-е изд. — К.: НИАТ, 1987. — 387 с.
8. Поверхностное упрочнение при виброобработке. // РТМ. — 1306.
9. Лупкин, Б. В. Применение дробеударной обработки в авиационной промышленности [Текст] / Б. В. Лупкин, С. Д. Младинов, В. А. Никитенко. Авиационно-космическая техника и технологии. — Вып. 2. — Х.: «ХАИ». 2006. — С. 17 — 21.
10. Давиденков, Н. Н. Динамические испытания металлов [Текст] / Н. Н. Давиденков. Л., М.: Машгиз, 1936. — 176 с.
11. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток турбины. Методические материалы [Текст] — М.: НИАТ. 1965. — 48 с.

Рецензент: д.т.н, проф. О. В. Мамлюк,

Киевский авиационный техникум, г. Киев.

Поступила в редакцию 28.01.13

Зміцнювальна обробка поверхневим пластичним деформуванням

Розглянуто процес поверхневого пластичного деформування алюмінієвих сплавів Д-16Т, В93-Т і сталі 30ХГСНМА методами віброударної дробоструминної обробки. Експериментальними даними доведено, що більш ефективним є метод дробоструминної обробки, яка забезпечує рівномірність стискальних залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу, що приводить до більш високої втомної міцності.

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування, віброзміцнення, дробеструминне зміцнення, стискальні залишкові напруження, утомна міцність, поверхневий шар матеріалу, технологічний режим оброблення.

Hardening by means of surface plastic forming

The process of surface plastic forming of the aluminum alloys of D-16T, V93-T grades and 30HGSNMA steel usingt methods of bead blasting vibroimpact treatment has been analyzed. Experimental data has proven that bead blasting is more effective method, which provides uniform strength against compressive residual stresses in the surface layer of material that ensures higher fatigue strength.

Keywords: surface plastic forming, hardening, bead blasting hardening, compressive residual stresses, fatigue strength, surface layer of material, process conditions.