

УДК 621.793.7

Б.В. ЛУПКИН¹, А.И. ЛАГУТИН²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Авиационный научно-технический комплекс «Антонов», Украина*

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА Д16Т

В статье приведены результаты исследований остаточных напряжений и долговечности образцов из алюминиевого сплава Д16Т после виброударной и пневмодробеструйной обработок. Установлено, что в поверхностном слое образцов после упрочнения возникают значительные сжимающие остаточные напряжения ($\sigma = 17 \div 20 \text{ кг/мм}^2$). Величина этих напряжений вместе с улучшением качества поверхностного слоя определяет увеличение долговечности упрочненных образцов. В зависимости от режимов и методов упрочнения долговечность испытанных образцов повысилась в $4 \div 8$ раз.

упрочнение, поверхностное деформирование, наклеп, остаточные напряжения, усталостная прочность, обработка дробью

Введение

Прогресс авиационной техники в значительной степени зависит от повышения физико-механических свойств конструкционных материалов и технологии их обработки.

Высокая статическая прочность материалов не всегда обеспечивает надлежащую усталостную долговечность изготовленных из них конструкций. Причиной этого является повышенная чувствительность высокопрочных материалов к концентраторам напряжений и знакопеременным нагрузкам.

Для более эффективного использования высоких значений механических свойств металлов необходимо повышать их конструкционную прочность, которая зависит от формы, размеров и условий работы детали. Большое значение при этом имеет технология изготовления.

Существует немало способов повышения конструкционной прочности металлов. Наиболее эффективным является упрочнение поверхностным пластическим деформированием.

После упрочнения поверхностным пластическим деформированием наблюдается существенное повышение сопротивления усталости и контактной

коррозии. Эти перечисленные факторы имеют место при работе авиационных узлов и конструкций. Упрочнение наиболее ответственных деталей и узлов значительно повышает их ресурс и надежность.

Благоприятное влияние упрочнения объясняется тремя факторами:

- сжимающими остаточными напряжениями;
- благоприятным микрорельефом поверхности;
- улучшением свойств поверхностного слоя, повышением его твердости и предела текучести.

Упрочнение увеличивает сопротивление металла повторно-переменным нагрузкам, а также обеспечивает значительное, в $5 \div 10$ раз увеличение их долговечности и антикоррозионной стойкости; на $20 \div 40\%$ повышает предел выносливости для гладких деталей и до 300% – для деталей с концентраторами напряжений.

Для упрочнения деталей сложной формы, имеющих большое количество выступов, пазов, галтелей наибольшее распространение получила обработка дробью.

Обработка дробью представляет собой поверхностное пластическое деформирование за счет ударов дроби по обрабатываемой поверхности заготов-

ки. Разнообразие методов обработки дробью обусловлено способом сообщения кинетической энергией (струя газа, не связанные колебания и др.).

Исследование остаточных напряжений после виброударной и дробеструйной обработки образцов

Наиболее распространенным из конструкционных материалов в авиационной отрасли является алюминиевый сплав Д16Т. Как правило, детали, изготавливаемые из данного материала, имеют сложную пространственную форму. Многочисленные ребра, усиления и выборки, являются опасными концентраторами напряжений и значительно снижают усталостную прочность, а также ограничивают долговечность детали в целом. Для уменьшения влияния этих негативных эффектов детали подвергаются общему упрочнению виброударным или дробеструйным методами.

Исследования влияния виброударного и пневмодробеструйного методов упрочнения различных деталей из сплава Д16Т позволили определить оптимальные режимы упрочнения и повысить эффективность обработки.

Определение остаточных напряжений. Остаточные напряжения определялись на образцах-свидетелях из сплава Д16Т. Образцы устанавливались в различных зонах обрабатываемой детали для того, чтобы можно было установить степень равномерности упрочнения по всем поверхностям детали.

Контроль остаточных напряжений и область их залегания производилась по измерению величины прогиба образцов-свидетелей (рис. 1) и изменению деформаций при непрерывном травлении на приборе ПИОН-2 (рис. 2).

При отработке режима упрочнения детали строилась кривая зависимости прогибов образца $f_{(a)}$ от времени упрочнения t (рис. 3), так называемая «кривая насыщения», с одновременным определением остаточных напряжений. Из анализа эпюр ос-

таточных напряжений находилась область оптимального времени упрочнения и прогиба образца $f_{(opt)}$ при заданных режимах обработки. В дальнейшем контроль качества упрочнения осуществляется сравнением прогибов образцов-свидетелей с оптимальным значением $f_{(opt)}$.

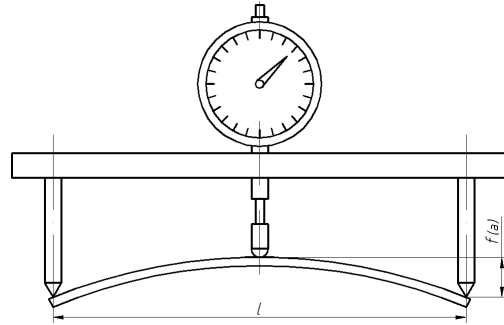


Рис. 1. Схема измерения прогиба образца-свидетеля

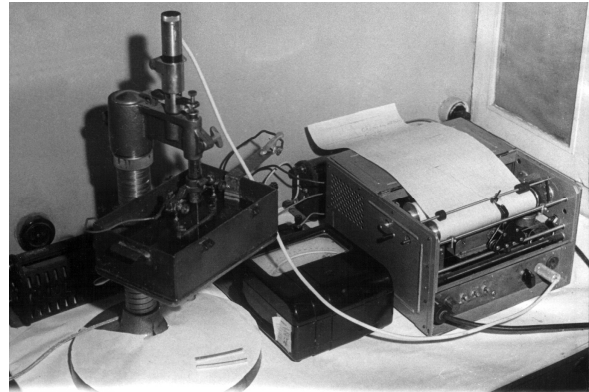


Рис. 2. Прибор ПИОН-2 для определения остаточных напряжений образцов-свидетелей

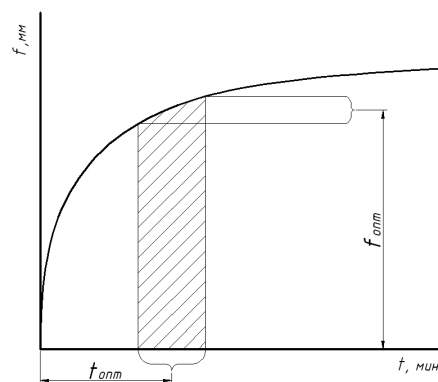


Рис. 3. График зависимости прогиба образца от времени упрочнения

По полученным данным (табл. 1) видно, что с увеличением прогиба образца возрастает глубина упрочненного слоя (глубина залегания остаточных сжимающих напряжений), на поверхности наблюда-

Таблица 1

Сравнение параметров упрочнения в зависимости от величины прогиба образца

Метод упрочнения	Прогиб f , мм	Напряжения		Глубина залегания σ_{max} , мкм	Глубина упрочненного слоя, мкм
		σ_{max} , кг/мм ²	$\sigma_{лов}$, кг/мм ²		
Виброударный, $\varnothing_{шар} = 3 \div 6$ мм	1	-20	-8	90	200÷240
Пневмодробеструйный, $\varnothing_{шар} = 3$ мм	2	-17	-5	100÷150	350÷400

ется снижение уровня остаточных напряжений, а σ_{max} смещается в глубину, что может приводить к некоторому снижению долговечности при усталостных испытаниях.

Остаточные напряжения после поверхностного пластического деформирования. Исследования остаточных напряжений, возникающие в образцах-свидетелях проводились после их виброударной и пневмодробеструйной обработки, на промышленных установках ВУД-2500 и УПДУ-3.

На образцах измерялась величина прогиба и остаточные напряжения, а для определения оптимального времени упрочнения строились кривые насыщения.

Виброударная обработка.

Обработка производилась по режиму:

- время упрочнения – $t = 40$ мин.;
- амплитуда колебаний – $A = 3,5 \div 4$ мм;
- частота колебаний – $f = 25$ Гц;
- диаметр шариков – $3 \div 6$ мм.

Образцы-свидетели устанавливались в различных зонах обрабатываемой детали, которая жестко крепилась в контейнере установки. Из эпюр остаточных напряжений (рис. 4) видно, что величина наибольших напряжений колеблется в пределах $18 \div 20$ кг/мм² (для нижней стороны) и $14 \div 17$ кг/мм² (для верхней стороны). Наибольшие остаточные напряжения залегают на глубине около 90 мкм, к поверхности наблюдается спад до 8 кг/мм². Толщина упрочненного слоя составляет $200 \div 240$ мкм.

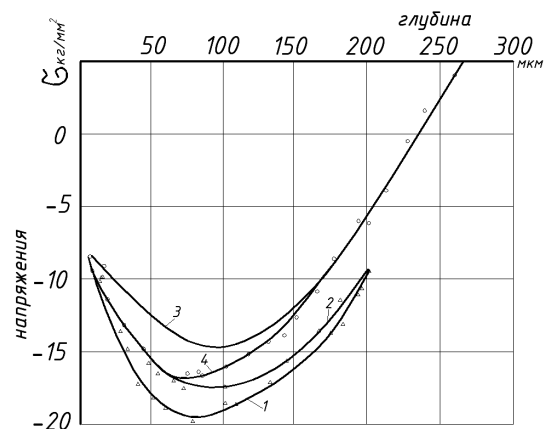


Рис. 4. Эпюры остаточных напряжений образцов после виброударной обработки:
1, 2 – напряжения на верхней стороне детали;
3, 4 – напряжения на нижней стороне детали
(время упрочнения 40 мин)

Неравномерность упрочнения выражается в разном уровне напряжений по различным поверхностям и составляет $3 \div 4$ кг/мм². Это вызывает коробление недостаточно жестких деталей. Чтобы избежать коробления необходимо уменьшить время упрочнения с 40 до 30 мин.

Однако наряду с уменьшением коробления наблюдается значительный спад (рис. 5) уровня остаточных напряжений до 15 кг/мм², при этом неравномерность наибольших напряжений составляет около 2 кг/мм².

Это свидетельствует о том, что данный режим является не оптимальным.

К недостаткам этого метода можно отнести следующее:

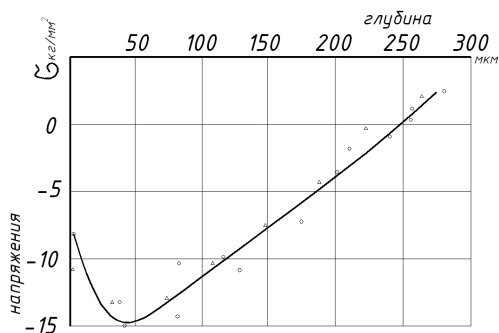


Рис. 5. Эпюры остаточных напряжений образцов после виброударной обработки (время упрочнения 20 мин)

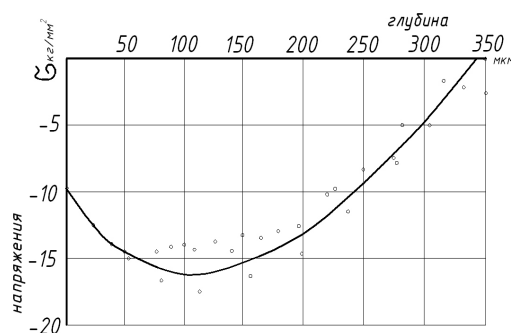


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений образцов после дробеструйной обработки (время упрочнения 2 – 4 мин)

– метод не производительный, так как большая часть времени уходит на вспомогательные операции, на обработку по одному циклу затрачивается $2,5 \div 3$ часа;

– для каждого типоразмера и материала деталей необходимо иметь свой контейнер, что препятствует увеличению номенклатуры упрочняемых деталей и значительно повышает стоимость упрочнения за счет изготовления, частого ремонта контейнеров;

– применяемые установки требуют большого количества дорогостоящих рабочих тел – шариков из стали ШХ-15;

– не обеспечивается равномерность упрочнения.

Пневмодробеструйная обработка

Обработка производилась по режиму:

- давление воздуха – $P = 2$ ат;
- диаметр шариков – $d_{ш} = 3$ мм;
- время упрочнения изменялось от 2 до 15 минут.

По эпюрам остаточных напряжений (рис. 6, 7) видно, что величина наибольшего сжимающего напряжения при времени упрочнения $2 \div 4$ минуты достигает 17 кг/мм^2 и залегает на глубине 140 мкм.

К поверхности наблюдается значительный спад напряжений. Толщина упрочненного слоя составляет $260 \div 300$ мкм.

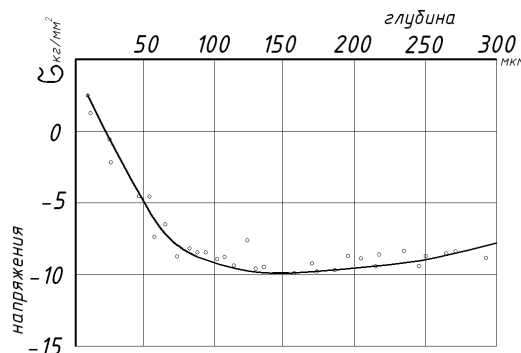


Рис. 7. Эпюры остаточных напряжений образцов после дробеструйной обработки (время упрочнения 15 мин)

С увеличением времени упрочнения до 15 мин величина наибольшего напряжения падает до 10 кг/мм^2 с увеличением толщины упрочненного слоя до 400 мкм и спадом остаточных напряжений к поверхности практически до нуля. Это явление нежелательно, так как спад к поверхности способствует снижению выносливости.

Анализируя кривую насыщения (рис. 8), построенную при постоянном давлении $P = 2$ ат и изменении времени обработки от 2 до 15 минут можно сделать вывод, что оптимальное время упрочнения составляет $3 \div 5$ мин. При таком интервале оптимальный прогиб ($f_{ном}$) образца-свидетеля находится в пределах $1,6 \div 1,8$ мм.

Чистота поверхности упрочненных образцов по сравнению с неупрочненной поверхностью изменяется незначительно. Она зависит от обрабатываемого материала, а также диаметра и силы удара шарика

ков, которые создают на поверхности сплошное покрытие отпечатками.

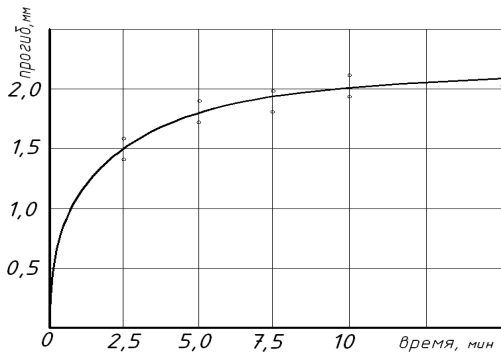


Рис. 8. Кривая насыщения после дробеструйной обработки

Однако, благоприятный микрорельеф (скругленная форма впадин) существенно препятствует зарождению усталостных трещин.

Исследование долговечности образцов после поверхностного пластического деформирования

Испытания на долговечность проводились на гидравлическом пульсаторе МУП-50 (рис. 9) при симметричном цикле нагружения с постоянной амплитудой.

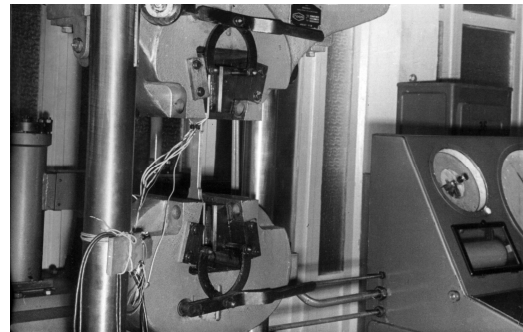


Рис. 9. Гидравлический пульсатор МУП-50

Частота нагружения составляла 1400 циклов в минуту. Использовались плоские образцы из Д16Т, изготовленные из материала одной плавки. Расположение волокон в образцах продольное, что соответствует условиям работы деталей в процессе эксплуатации. Эти образцы обрабатывались вместе с образцами-свидетелями, на которых замерялся прогиб, и определялись остаточные напряжения. Исследовались как оптимальные, так и не оптимальные режимы обработки. В каждой партии по $8 \div 10$ образцов.

Результаты усталостных испытаний неупрочненных и упрочненных различными методами образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний образцов

Обработка	Режим обработки	Количество циклов до разрушения (диапазон)
Неупрочненные	Фрезерование	от $0,16 \cdot 10^6$ до $0,21 \cdot 10^6$
Виброударная	$t = 40$ мин $A = 3,5 \div 4$ мм $f = 25$ Гц $d_{ш} = 3 \div 6$ мм	от $0,43 \cdot 10^6$ до $2,31 \cdot 10^6$
	$t = 20$ мин $A = 3,5 \div 4$ мм $f = 25$ Гц $d_{ш} = 3 \div 6$ мм	от $0,39 \cdot 10^6$ до $1,44 \cdot 10^6$
Пневмодробеструйная	$P = 2$ ат $d_{ш} = 2$ мм $t = 2 \div 4$ мин	от $0,98 \cdot 10^6$ до $1,83 \cdot 10^6$

Как видно из полученных результатов, каждый метод упрочняющей обработки существенно увеличивает долговечность образцов (рис. 10).

Виброударная обработка при оптимальном режиме $t = 40$ мин дает увеличение долговечности в 7 раз. При этом наличие более высоких напряже-

ний до 20 кг/мм^2 дает меньший эффект упрочнения по сравнению с дробеструйной обработкой.

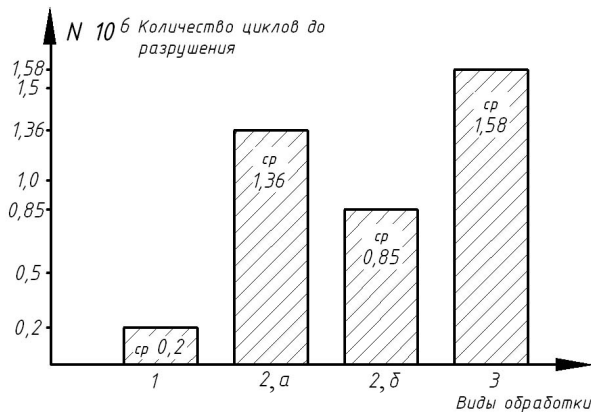


Рис. 10. Результаты усталостных испытаний образцов: 1 – фрезерование; 2, а – виброударная обработка $t = 40$ мин; 2, б – виброударная обработка $t = 20$ мин; 3 – дробеструйная обработка

Это объясняется меньшей в 2 раза глубиной залегания остаточных напряжений и большим рассеянием долговечности образцов. Это нежелательное явление, свидетельствует о неравномерности упрочнения различных зон детали, что может повлечь преждевременную поломку.

Уменьшение времени виброударной обработки образцов до 20 мин снизило среднюю долговечность в 1,5 раза, сократив при этом рассеяние в 2 раза, причем наименьшая долговечность в партии осталась той же.

Пневмодробеструйная обработка образцов увеличила их усталостную долговечность в 8 раз при значительно меньшем рассеянии и времени обработки.

Заключение

Результаты определения остаточных напряжений и испытаний на долговечность показали, что упрочнение является большим резервом повышения надежности авиационных деталей.

Анализ эпюр остаточных напряжений, возникающих после упрочнения в материале Д16Т, показывает, что долговечность образцов зависит не только от их максимальной величины, но и от характера залегания в поверхностном слое. Так, в идеальном случае поверхностный слой должен иметь напряженное состояние с максимальным значением непосредственно на поверхности и залеганием с той же величиной на глубину 500 мкм.

Результаты испытаний на выносливость показали, что долговечность образцов возрастает по сравнению с неупрочненными после виброударной обработки в 6,8 раза при $t = 40$ мин, и в 4 раза при $t = 20$ мин, а пневмодробеструйной обработки в 8 раз.

Отклонения режимов упрочнения существенно сказывается на долговечности, снижая ее в 2 ÷ 3 раза по сравнению с оптимальными режимами.

Литература

1. Поверхностное упрочнение деталей из алюминиевых сплавов. Инструкция № 949–69 ВИАМ.
2. Финишная и упрочняющая обработка типовых деталей шасси РТМ 1.4.778-80.
3. Поверхностное упрочнение при виброобработке РТМ-1306.
4. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп. – М.: Машгиз, 1955. – 234 с.
5. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Сагитов М.А. Влияние остаточных напряжений и наклепа на выносливость в условиях концентрации напряжений // Труды Куйбышевского авиационного института. – Куйбышев, КАИ, 1974. – Вып. 69. – С. 34 – 39.

Поступила в редакцию 14.12.2005

Рецензент: канд. техн. наук О.В. Мамлюк, Киевский авиационный техникум, Киев.