

УДК 620.178.35:669.715

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102

А.В. Гриневи<sup>1</sup>, Ю.С. Румянцев<sup>2</sup>, Л.В. Морозова<sup>1</sup>, А.Л. Терехин<sup>1</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1163-Т И В950.ч.-Т2 ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

*Проведены исследования усталостной долговечности образцов корсетного типа из конструкционных сплавов на основе алюминия – 1163-Т и В950.ч.-Т2 – после поверхностного упрочнения различного типа: виброударного упрочнения стальными шариками, виброударной абразивной обработки керамическими чипсами и дробеметного упрочнения стальной дробью.*

*Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами поверхности приводит к повышению усталостной долговечности при относительно большом разбросе значений этой характеристики, что вызвано, по-видимому, дефектами, создаваемыми абразивными частицами. Виброударное упрочнение стальными шариками дает более стабильные результаты и характеризуется меньшим разбросом полученных значений усталостной долговечности. Режимы обработки, выбранные при дробеметном упрочнении стальной дробью, не привели к существенному росту значений усталостной долговечности сплава В950.ч.-Т2 и отмечены разбросом значений данной характеристики для сплава 1163-Т.*

**Ключевые слова:** *поверхностное упрочнение, алюминиевые сплавы, усталостная долговечность, виброупрочнение.*

*Study of fatigue life of 1163-T and V950.ch.-T2 aluminum structural alloys specimens of hour-glass type was performed after a surface hardening of different kinds: shock-vibration hardening with steel balls, shock-vibration abrasive machining with ceramic chips and hardening with steel shots.*

*The shock-vibration abrasive surface machining with ceramic chips results in growing of fatigue life at relatively high dispersion of this characteristic that obviously was initiated by defects caused by abrasive particles. The shock-vibration hardening with steel balls gives more stable results and is characterized by the less dispersion of fatigue life obtained values. The chosen regimes of hardening with steel shots didn't lead to a substantial increase of V950.ch.-T2 alloy fatigue life meanings and are characterized by a dispersion of this characteristic values for 1163-T alloy.*

**Keywords:** *surface hardening, aluminum alloys, fatigue life, shock-vibration hardening.*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Национальный институт авиационных технологий [National Institute of Aviation Technologies] E-mail: info@niat.ru

**Введение**

Основным фактором повышения ресурса конструкции летательных аппаратов, эксплуатация которых сопряжена с действующими на них переменными нагрузками, является усталостная долговечность конструкционных сплавов. Изыскания по повышению характеристик работоспособности материалов отражены в многочисленных работах [1–4]. Однако стремление повысить усталостную долговечность, опираясь на традиционные методы металловедения путем повышения прочности материала, не привело к ощутимым результатам. В монографии С.И. Кишкиной [5] представлен анализ усталостных испытаний сплавов на алюминиевой основе, показавший, что при повышении предела прочности алюминиевых сплавов более чем в 2 раза – с 275 до 698 МПа, предел выносливости повышается не более чем на 9,81–14,8 МПа для гладких образцов и практически остается неизменным для образцов с концентратором. Поскольку не было достигнуто существен-

ного повышения усталостной долговечности конструкционных алюминиевых сплавов путем вариации состава сплавов и режимов термообработки, усилия исследователей сконцентрировались на изучении характеристик поверхностного слоя, ответственного, в большинстве случаев, за усталостное разрушение. Усталостные характеристики материала повышались благодаря улучшению качества поверхности за счет перехода от механической обработки (точение и фрезерование) к шлифованию и полированию. Однако наиболее перспективным методом повышения усталостной долговечности оказалось поверхностное упрочнение. С.И. Кишкина уже в первой работе [6] показала возможности данного метода, установив, что при поверхностном упрочнении в ряде случаев можно отказаться от дорогостоящей операции – полирования. Несмотря на большой объем выполненных исследований по изучению влияния состояния поверхности на механические характеристики материала [7–10], эта проблема остается

актуальной и в настоящее время, поскольку необходимо наряду с задачей повышения усталостной долговечности найти оптимальный и наиболее экономически выгодный технологический режим поверхностного упрочнения, приемлемый для обработки деталей сложной конфигурации. Сложность решения данной проблемы вызвана ее многофакторностью – это и микрорельеф поверхности, и формирование напряженного состояния, уменьшающего напряжения от внешнего воздействия, и деформационное упрочнение, и, наконец, влияние фазового состава поверхностного слоя – на что обращала внимание С.И. Кишкина в своей первой монографии [6]. Оптимизация процесса упрочнения предполагает выбор технологической схемы, обеспечивающей обработку сложной геометрической поверхности при минимизации экономических затрат.

#### Материалы и методы

В данной работе проводилась оценка следующих технологических приемов упрочнения: виброударной абразивной обработки керамическими чипсами, виброударного упрочнения стальными шариками и дробеметного упрочнения стальной дробью. В качестве критерия оценки принята усталостная долговечность образцов с поверхностным упрочнением, выполненным по вышеприведенным схемам.

Для исследований выбраны полуфабрикаты алюминиевых сплавов марок 1163-Т и В950.ч.-Т2, определяющих конструктивный облик планера летательных аппаратов. Плоские образцы корсетного типа изготавливались из листа толщиной 10 мм. Образцы шириной 40 мм имели рабочую зону шириной  $20 \pm 0,05$  мм. Толщина образцов находилась в пределах  $4 \pm 0,05$  мм. Эскиз образца представлен на рис. 1.

Усталостные испытания образцов из сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 проводили на машине резонансного типа HFR100 фирмы Zwick/Roell Amsler (Германия) при коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $R=0,1$  и частоте испытаний 45–50 Гц.

Для определения приемлемой базы испытаний проведена оценка усталостной долговечности образцов при разных уровнях максимальных напряжений цикла: 227; 255 и 284 МПа. Наиболее приемлемым значением напряжения является 255 МПа, поскольку на этом уровне возможно получить наиболее контрастную ранжировку исследуемых сплавов. Учитывая стоимостные затраты на испытания и их ограниченность временными сроками, испытания проводили при напряжении 255 МПа, которые ограничивали наработкой в  $10^6$  циклов нагружения, и, в случае отсутствия разрушения образца, осуществляли переход на уровень с максимальным напряжением цикла 284 МПа и доведением образца до усталостного разрушения.

#### Результаты

Результаты усталостных испытаний корсетных образцов из сплава 1163-Т представлены в табл. 1 – приведена усталостная долговечность, характеризуемая количеством циклов нагружения до разрушения ( $N_p$ ) и количеством циклов до возникновения трещины ( $N_0$ ). Характеристику  $N_0$  определяли по изменению частоты нагружения, что является достаточно условным показателем. Однако можно констатировать, что для корсетных образцов значения наработки между  $N_p$  и  $N_0$  крайне незначительны.

Иллюстрация полученных результатов представлена на рис. 2, на котором приведены результаты испытаний образцов из сплава 1163-Т, прошедших механическую обработку (фрезерование), а также виброударную абразивную обработку керамическими чипсами и виброударное упрочнение стальными шариками. Характер разрушения и внешний вид испытанных образцов из сплава 1163-Т представлен на рис. 3.

Результаты испытаний на усталость корсетных образцов из сплава В950.ч.-Т2 представлены в табл. 2.

На рис. 4 иллюстрируются результаты испытаний образцов из сплава В950.ч.-Т2, прошедших механическую обработку (фрезерование), а также виброударную абразивную обработку керамическими чипсами и виброударное упрочнение стальными шариками. Характер разрушения и внешний вид испытанных образцов из сплава В950.ч.-Т2 представлен на рис. 5.

Наряду с образцами, прошедшими виброударную абразивную обработку керамическими чипсами и виброударное упрочнение стальными шариками, исследовали образцы после дробеметного упрочнения стальной дробью, выполненного в заводских условиях. Результаты испытаний таких образцов представлены в табл. 3.

Внешний вид разрушенных образцов представлен на рис. 6.

#### Обсуждение и заключения

Небольшой объем испытанных образцов не дает основания для статистической оценки и формирования выводов, но некоторые тенденции влияния технологии поверхностного упрочнения на усталостное разрушение можно выявить при анализе полученных результатов.

Следует отметить незначительный разброс значений усталостной долговечности, полученный при испытании исходных образцов после фрезерования, что указывает на стабильность характеристик материала, идентичность технологии механической обработки и условий испытаний.

Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами, обеспечивая почти рекордные показатели повышения усталостной долговечности, приводит к значительному разбросу значений данной характеристики. Так, для сплава В950.ч.-Т2

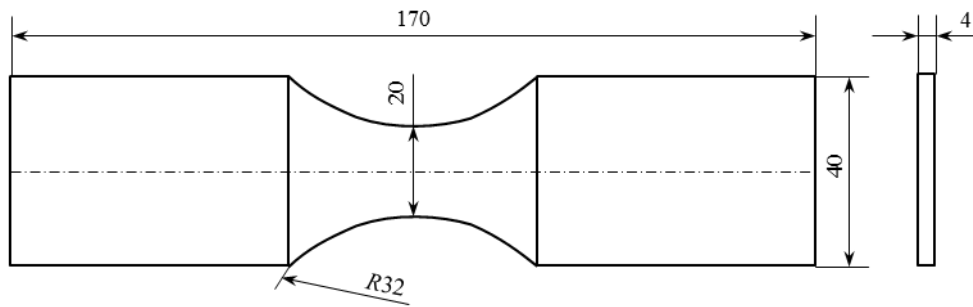


Рис. 1. Эскиз образца для определения усталостной долговечности алюминиевых сплавов

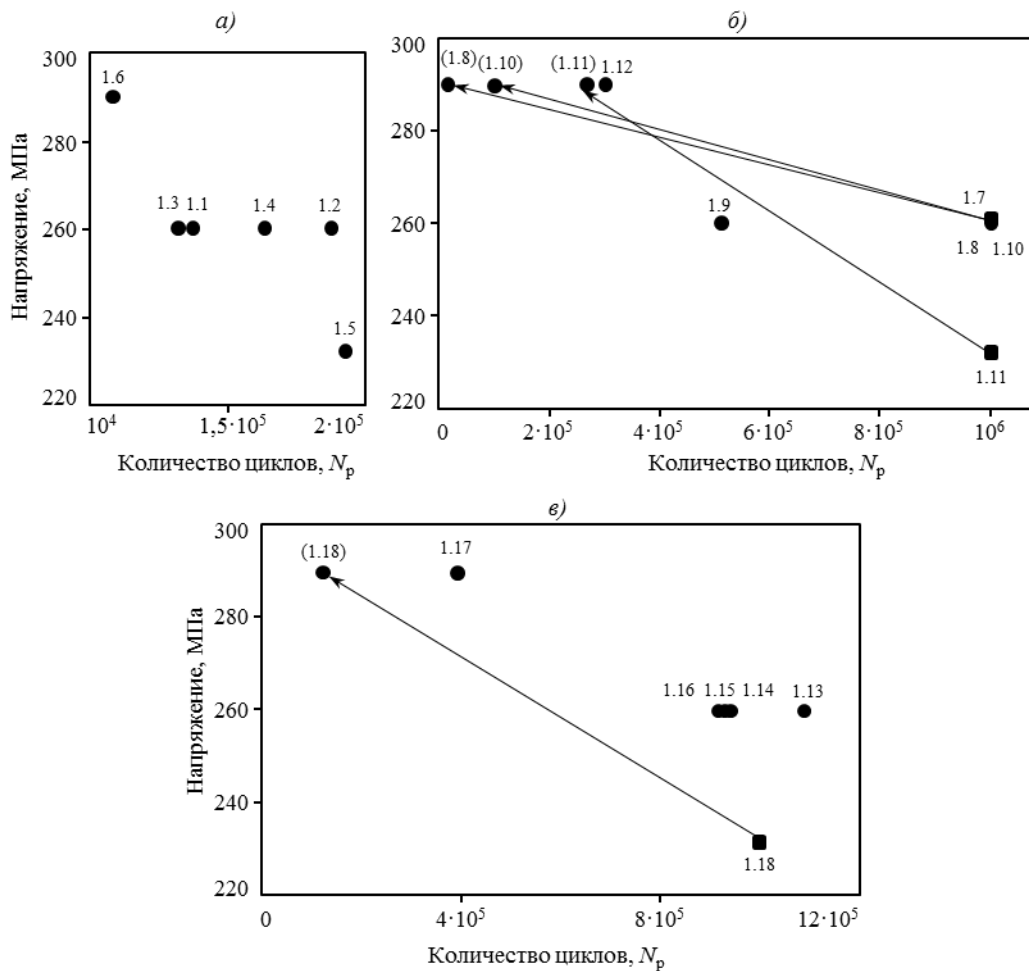


Рис. 2. Усталостная долговечность образцов из сплава 1163-Т (цифры при точках – номера образцов из табл. 1):  
 а – исходная фрезерная обработка; б – виброударная абразивная обработка керамическими чипсами; в – виброударное упрочнение стальными шариками

Таблица 1

## Усталостная долговечность образцов из сплава 1163-Т

Технологическая схема упрочнения	Условный номер образца	$\sigma$ , МПа	$N_p$	$N_0$
			ЦИКЛ	
Исходная фрезерная обработка	1.1	255	136460	136460
	1.2	255	187510	187250
	1.3	255	130860	130000
	1.4	255	163480	163000
	1.5	228	192840	192500
	1.6	284	107490	107000
Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами	1.7	255	998090	998090
	1.8	255 (284)	$10^6$ (19110)	$10^6$ (19110)
	1.9	255	512940	512000
	1.10	255 (284)	$10^6$ (99950)	$10^6$ (99950)
	1.11	255 (284)	$10^6$ (266970)	$10^6$ (266860)
	1.12	284	304270	304270
Виброударное упрочнение стальными шариками	1.13	255	1093250	1092000
	1.14	255	939040	936000
	1.15	255	937080	936850
	1.16	255	924850	924000
	1.17	284	392960	392960
	1.18	228 (284)	$10^6$ (124400)	$10^6$ (124100)

Примечание. В скобках – значения при повторном нагружении с максимальным напряжением цикла.

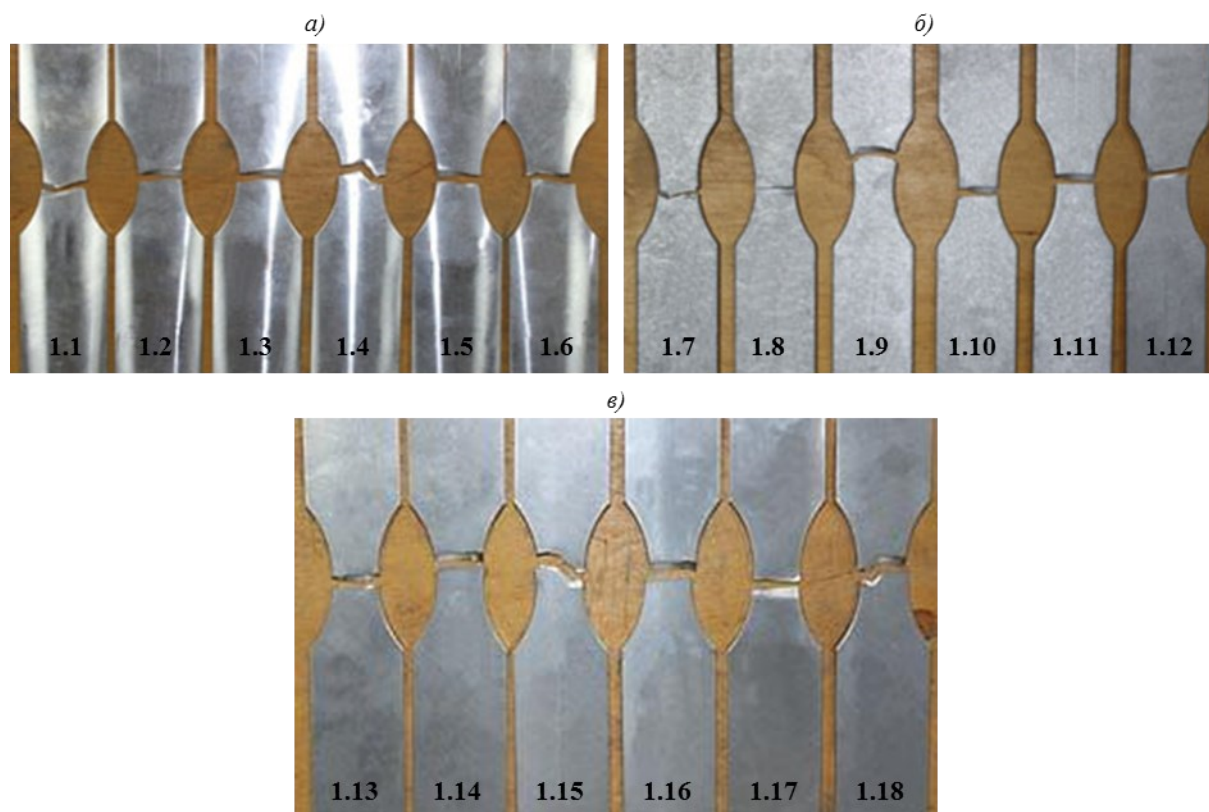


Рис. 3. Характер разрушения образцов из сплава 1163-Т (номера образцов – см. табл. 1):  
*a* – исходная фрезерная обработка; *б* – виброударная абразивная обработка керамическими чипсами; *в* – виброударное упрочнение стальными шариками

Таблица 2

Усталостная долговечность образцов из сплава В950.ч.-Т2

Технологическая схема упрочнения	Условный номер образца	$\sigma$ , МПа	$N_p$	$N_0$
			цикл	
Исходная фрезерная обработка	2.1	255	115800	115800
	2.2	255	191730	190700
	2.3	255	185130	184000
	2.4	255	388480	387000
	2.5	284	71380	70760
	2.6	228	396080	390000
Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами	2.7	284	17770	17770
	2.8	255	1052930	1052930
	(284)	(284)	(315000)	(313000)
	2.9	255	537260	534000
	2.10	255	380560	380000
	2.11	255	392700	391800
2.12	228	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	
(284)	(284)	(143660)	(142000)	
Виброударное упрочнение стальными шариками	2.13	255	2900000	2898500
	2.14	255	1821930	1821930
	(284)	(284)	(471960)	(466500)
	2.15	255	290900	290700
	2.16	228	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
	(284)	(284)	(190300)	(190300)
2.17	284	382580	381500	

Примечание. В скобках – значения при повторном нагружении с максимальным напряжением цикла.

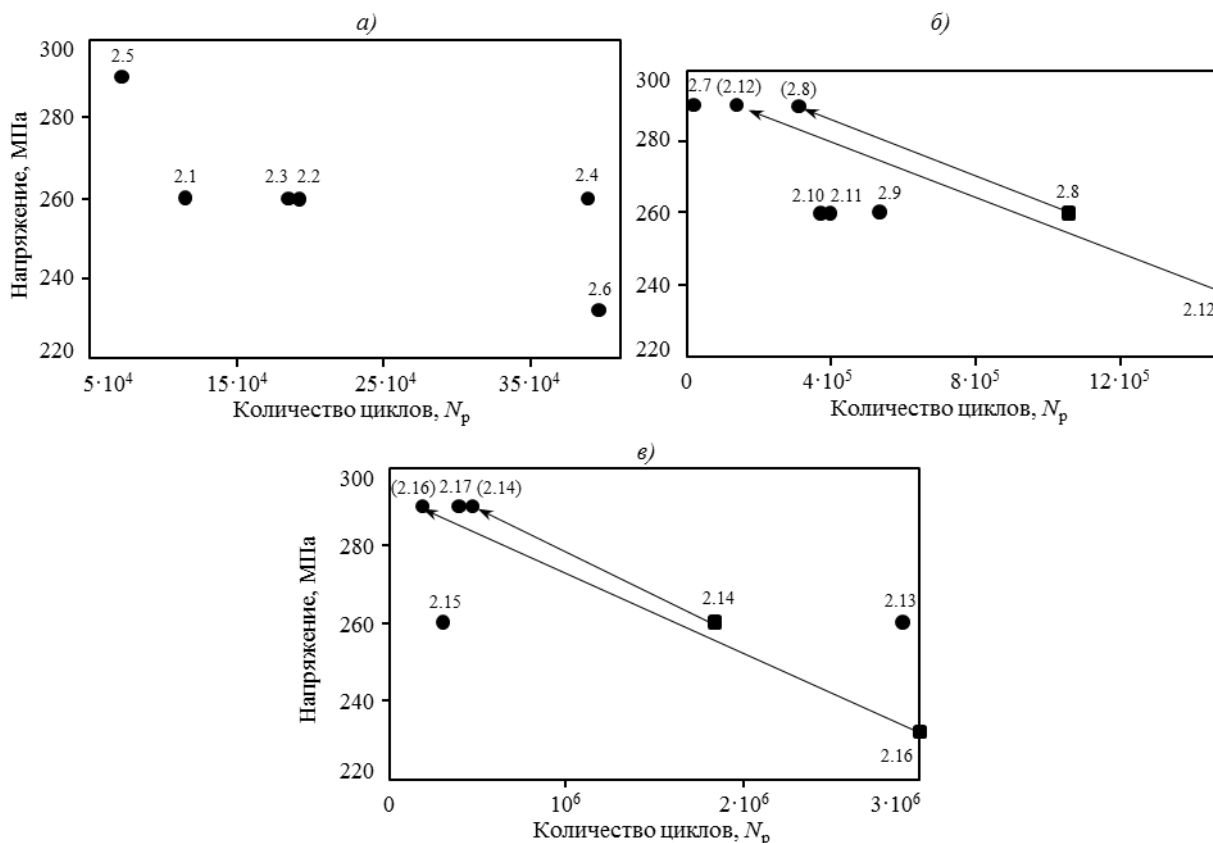


Рис. 4. Усталостная долговечность образцов из сплава В950.ч.-Т2 (цифры при точках – номера образцов из табл. 2):

а – исходная фрезерная обработка; б – виброабразивная обработка керамическими чипсами; в – виброупрочнение стальными шариками

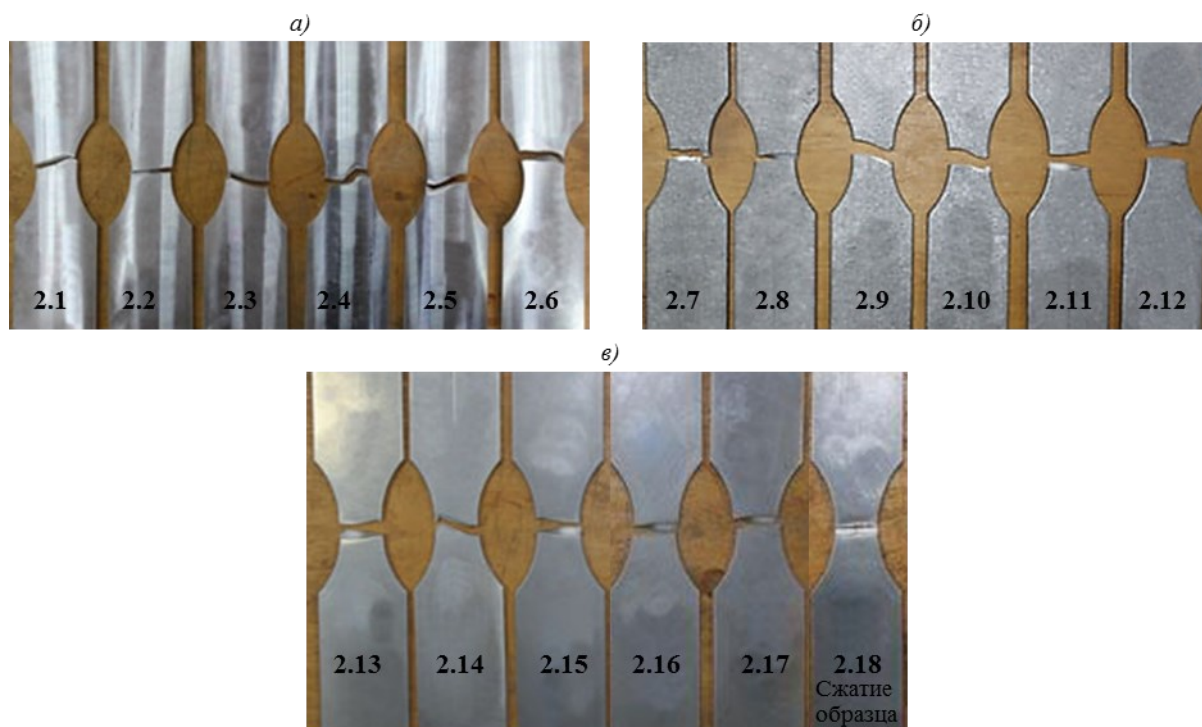


Рис. 5. Характер разрушения образцов из сплава В950.ч.-Т2 (номера образцов – см. табл. 2):  
 а – исходная фрезерная обработка; б – виброударная абразивная обработка керамическими чипсами; в – виброударное упрочнение стальными шариками

Таблица 3

Результаты испытаний образцов после дробеметного упрочнения стальной дробью

Сплав	Условный номер образца	$\sigma_{max}$ , МПа	Количество циклов нагружения	Примечание*
В95п.ч.-Т2	1	255	271060	$l=2,12$ мм, $L=6,33$ мм $l=2,11$ мм, $L=6,82$ мм $l=2,4$ мм, $L=6,69$ мм
	2	255	397050	
	3	255	200360	
1163-Т	1	255	775720	Два очага: $l_1=3,63$ мм, $l_2=6,49$ мм Характер макроизлома – срез $l=3,2$ мм, $L=7,09$ мм
	2	255	2232200	
	3	255	1446500	

\*  $l$  – длина начальной усталостной зоны, перпендикулярной растягивающей нагрузке;  $L$  – длина зоны смешанного разрушения с участками, перпендикулярными к растягивающей нагрузке.

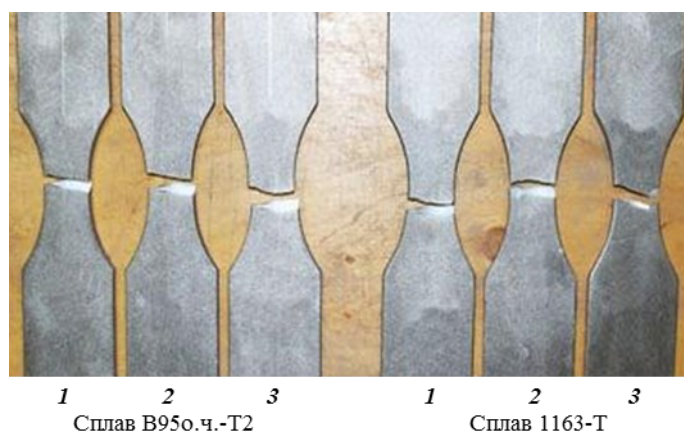


Рис. 6. Внешний вид испытанных образцов из сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2, прошедших дробеметное упрочнение стальной дробью

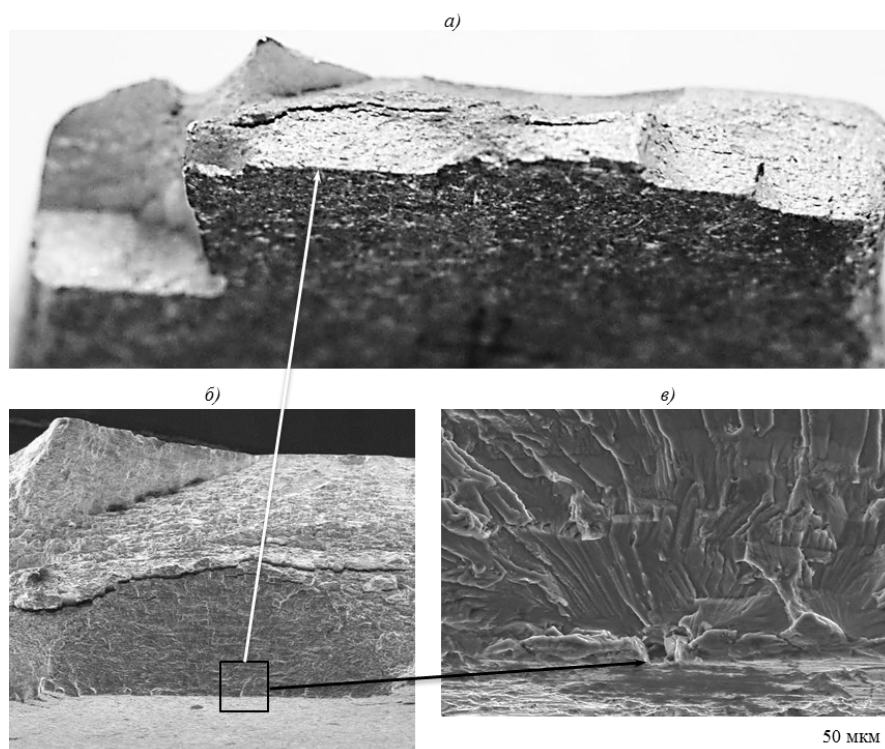


Рис. 7. Характер разрушения образца 2.7 (см. рис. 5 и табл. 2) из сплава В950.ч.-Т2 ( $\sigma=284$  МПа,  $N=17700$  циклов):

*a* – общий вид излома; *б* – вид одной из усталостных трещин; *в* – очаг усталостной трещины

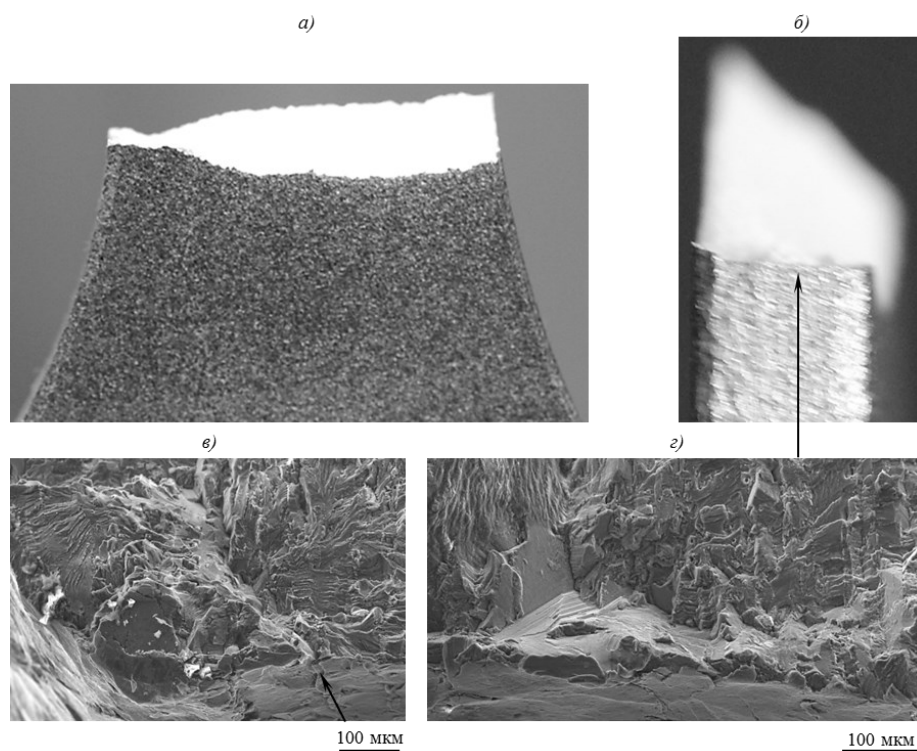


Рис. 8. Типичный характер усталостного разрушения корсетных образцов из алюминиевых сплавов:  
*a* – общий вид образца со стороны боковой поверхности; *б* – вид с торцевой поверхности; *в* – начало разрушения; *г* – сколы по наклепанному слою



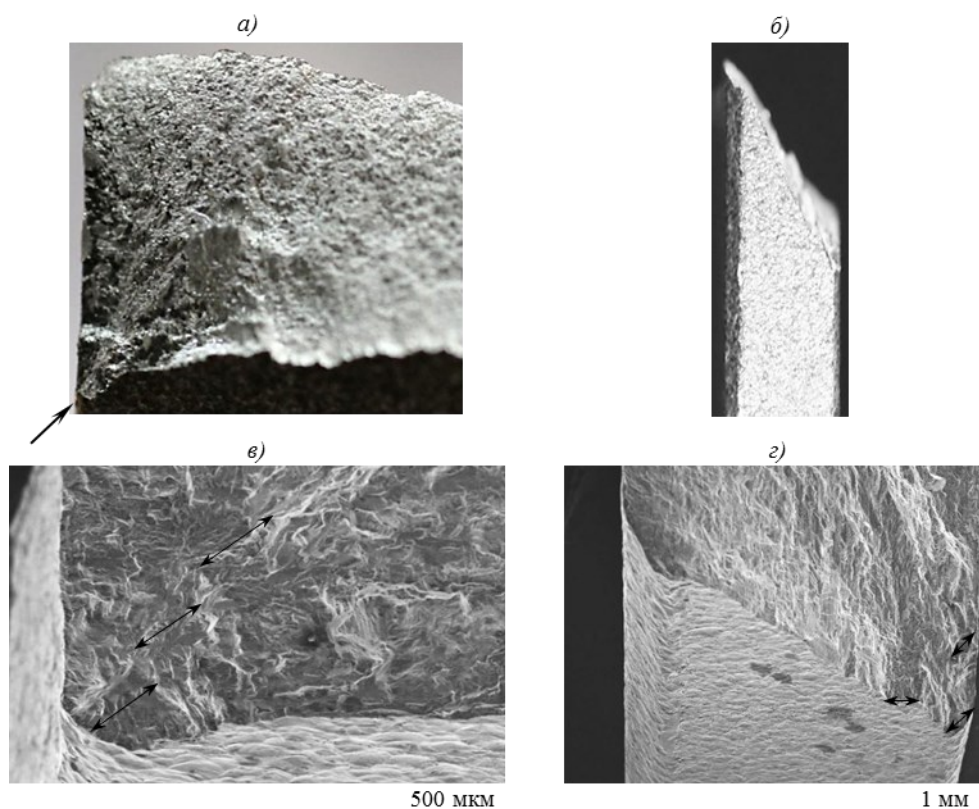


Рис. 9. Характер усталостного разрушения образца 2 (см. табл. 3) из сплава 1163-Т:  
 а – начало разрушения; б – вид образца и плоскости разрушения с торцевой поверхности; в – стрелками отмечены границы площадок с развитием разрушения от нормальных растягивающих напряжений; г – вид площадок с торцевой поверхности

разброс значений составляет: от 380560 при нагружении  $\sigma=255$  МПа до 1052930 при  $\sigma=255$  МПа+315000 циклов при  $\sigma=284$  МПа; для сплава 1163-Т разброс значений находится в пределах от 512940 при  $\sigma=255$  МПа до  $10^6$  при 255 МПа+99950 циклов при нагружении  $\sigma=284$  МПа. Степень снижения усталостной долговечности для более высокопрочного материала (сплава В950.ч.-Т2) оказывается более существенной по сравнению с менее прочным сплавом 1163-Т. Причиной столь значительного разброса значений усталостной долговечности при виброударной абразивной обработке керамическими чипсами являются, по-видимому, незначительные острые надрезы, являющиеся концентраторами напряжения и очагами образования усталостных трещин при переменном нагружении. Данную гипотезу иллюстрирует характер образования усталостных трещин на образце 2.7 (см. рис. 5 и табл. 2) из сплава В950.ч.-Т2, который разрушился при 17700 циклах нагружения при  $\sigma=284$  МПа. Заметим, что усталостная долговечность образца 2.8 (см. табл. 2) при  $\sigma=284$  МПа составила 315000 циклов с предварительным усталостным повреждением  $10^6$  циклов нагружения при  $\sigma=255$  МПа. Разрушение образца 2.7 (см. рис. 5)

носит многоочаговый характер. Очаги повреждения, явившиеся началом усталостного разрушения, расположены на разных уровнях, в том числе и на плоскости рабочей части. Общий вид поверхности разрушения с детализацией очагов разрушения образца 2.7 представлен на рис. 7.

По сравнению с виброударной абразивной обработкой керамическими чипсами виброударное упрочнение стальными шариками дает более стабильные показатели усталостной долговечности для сплава 1163-Т. При виброударном упрочнении стальными шариками образцов из сплава В950.ч.-Т2 наблюдается существенный (фактически в 10 раз) разброс в показателях усталости (см. табл. 2) – от 290900 (образец 2.15) до 2900000 (образец 2.13) циклов нагружения при  $\sigma=255$  МПа. Случайность или закономерность столь большого разброса при поверхностном упрочнении стальными шариками сплава В950.ч.-Т2 являются предметом дальнейших исследований.

Технологические режимы дробеметного упрочнения стальной дробью не привели к повышению усталостной долговечности образцов из сплава В950.ч.-Т2. Если исходная долговечность фрезерованных образцов находилась в диапазоне



115800–388480 циклов (при  $\sigma=255$  МПа), то после дробеметного упрочнения (см. табл. 3) диапазон составил 200360–397050 циклов нагружения. Поверхностное упрочнение дробью образцов из сплава 1163-Т при  $\sigma=255$  МПа привело к значительному росту усталостной долговечности (см. табл. 3), находящейся в диапазоне 775720–2232200 циклов нагружения. При испытании на усталость образцов с дробеметным упрочнением отмечен факт изменения характера макроразрушения. Разрушению всех образцов предшествовал момент образования усталостной трещины от нормальных напряжений и последующий ее рост с образованием усталостной зоны, перпендикулярной растягивающим напряжениям. Затем происходил поворот плоскости разрушения, и окончательное разрушение можно квалифицировать как разрушение от касательных напряжений.

Данный вид разрушений имеет место как для образцов из сплава 1163-Т, так и из сплава В950.ч.-Т2, для всех типов поверхностного упрочнения. Иллюстрация разрушений подобного вида представлена на рис. 8.

Однако на образце 2 (см. табл. 3) из сплава 1163-Т отсутствует макроплощадка, перпендикулярная к растягивающим напряжениям, и разрушение происходит как бы только от касательных напряжений. Характер разрушения образца 2 (см. табл. 3) из сплава 1163-Т представлен на рис. 9. Следует отметить, что усталостная долговечность данного образца значительно превосходит долговечность остальных образцов, прошедших дробеструйную обработку.

Детальное фрактографическое исследование выявило зоны разрушения от нормальных напряжений, расположенных в разной плоскости. Исследование начального очага усталостного разру-

шения и его развитие в макротрещину дают возможность более детально описать механизм разрушения упрочненного поверхностного слоя и оптимизировать его параметры.

Полученный факт изменения характера разрушения показывает возможность воздействия на характер макроразрушения путем формирования определенного напряженного состояния и, как следствие, воздействия на характеристику усталостной долговечности.

Проведенные исследования изменения усталостной долговечности в зависимости от технологии поверхностного упрочнения продемонстрировали возможность существенного повышения сопротивления усталостному разрушению. Сравнение по минимальным показателям усталостной прочности показывает, что виброударная абразивная обработка керамическими чипсами повышает усталостную долговечность сплава 1163-Т в 3,9 раза, а сплава В950.ч.-Т2 – в 3,3 раза; виброударное упрочнение стальными шариками повышает усталостную долговечность сплава 1163-Т в 7,1 раза, а сплава В950.ч.-Т2 – в 2,5 раза. Дробеструйное упрочнение стальной дробью повысило усталостную долговечность сплава 1163-Т в 5,6 раза и практически не изменило усталостную долговечность сплава В950.ч.-Т2. Следует рассмотреть полученные значения в первом приближении из-за ограниченного объема испытаний и условности сравнения.

Исследования продемонстрировали возможность повышения усталостной долговечности алюминиевых сплавов различными технологическими приемами упрочнения поверхности и необходимость разрабатывать для каждого материала наиболее оптимальную технологическую схему поверхностного упрочнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 174–183.
4. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 10 (viam-works.ru).
5. Ратнер С.И. Разрушение при повторных нагрузках. М.: Оборонгиз. 1959. 352 с.
6. Ратнер С.И. Прочность и пластичность металлов. М.: Оборонгиз. 1949. 152 с.
7. Ерасов В.С., Рудаков А.Г., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Образование магистральной трещины в процессе испытания на усталость //В сб. докладов конф. «Фундаментальные исследования в области защиты от коррозии, старения, биоповреждений материалов и конструкций в различных климатических условиях и природных средах, с целью обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических систем». М.: ВИАМ. 2013. С. 16.
8. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. № 10. Ст. 6 (viam-works.ru).
9. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я. и др. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.

10. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р., Нужный Г.А. Определение скорости пластической деформации при испытании на растяжение //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №5. С. 61–63.
11. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и представлении результатов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 62–67.
12. Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Методы оценки расчетных значений характеристик прочности авиационных материалов в России и за рубежом //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №12. С. 2–8.
13. Проходцева Л.В., Ерасов В.С., Лаврова О.Ю., Лавров А.В. Влияние формы цикла на усталостные свойства и микростроение изломов титанового сплава ВТ3-1 //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 54–58.
14. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
15. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности //Вопросы материаловедения. 2013. №1(73). С. 212–219.
16. Ерасов В.С. Современные методы оценки физико-механических свойств материалов /В сб. докладов Всероссийской конф. по испытаниям и исследованиям «ТестМат–2012». М.: ВИАМ. 2012 (CD-диск).
17. Устройство для испытания прочностных свойств конструкционных материалов: пат. на полезную модель 102801 Рос. Федерация; опубл. 15.10.2010.