

УДК 621.924

DOI: 10.12737/article\_5971dbbf4e3ee2.23021556

**А.П. Бабичев**, д.т.н.

(Донской государственный технический университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

**П.Д. Мотренко**, д.т.н.

(ПАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону)

E-mail: vibrotech@mail.ru

## **Инновационные технологии виброволновой обработки деталей машиностроения и вертолетостроения**

*Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований с целью изучения особенностей взаимодействия волн деформаций с образцами из различных материалов, подвергнутыми различным схемам виброволнового нагружения.*

**Ключевые слова:** виброволновая обработка; качество поверхности; деформация.

**A.P. Babichev**, D. Eng.,

(Don State Technical University 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344010)

**P.D. Motrenko**, D. Eng.

(PJ-S Co "Rostvertol", Rostov-upon-Don 319)

## **Innovation technologies of parts vibro-wave machining of engineering and helicopter production**

*The results of theoretical and experimental investigations with the purpose of the analysis of peculiarities in the interaction of deformation waves with samples of different materials subjected to different circuits of vibro-wave loading are shown.*

**Keywords:** vibro-wave machining; surface quality; deformation.

Виброволновые процессы и явления в технологии машиностроения и металлообработки представляют особый интерес, создавая условия для разработки новых методов обработки, и находят широкое применение в физике деформационных процессов [1 – 5]. Для изучения приведенных предпосылок выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований с целью изучения особенностей взаимодействия волн деформаций с образцами, подвергнутыми различным схемам виброволнового нагружения.

Одним из примеров является исследование виброволнового нагружения образца в виде закрытого корпуса с разъёмными соединениями (рис. 1.).

Представленный на рис. 1 «корпус» состо-

ит из 4-х «стенок» с размерами 60×70×10 и 70×80×10 мм, и 2-х «крышек» с размерами 80×80×10 мм. Сборка «корпуса» выполнена с помощью болтовых соединений. Для проведения эксперимента изготовлены два «корпуса» с одинаковыми габаритными размерами, но выполненными из разного материала. Материал образцов – сталь 30ХГСА и алюминиевый сплав АВТ1. Буквами «Л» и «Т» обозначены, соответственно, лицевые (наружные) и тыльные (внутренние) стороны образцов.

Технологическая схема одностороннего виброволнового нагружения модели (образца) виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом (ШСУ) представлена на рис. 2.

Продолжительность обработки – 10, 60 и

120 с. Радиус сферы контактных поверхностей, деформирующих элементов инструмента (стержней) составляет  $R = 2,5$  мм.

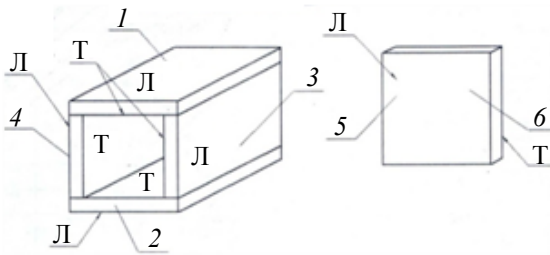


Рис. 1. Сборочная единица «корпус»:

1, 2 – стенка 70×80×10; 3, 4 – стенка 60×70×10; 5, 6 – крышка 80×80×10 (5 и 6 в сборе условно не указаны)

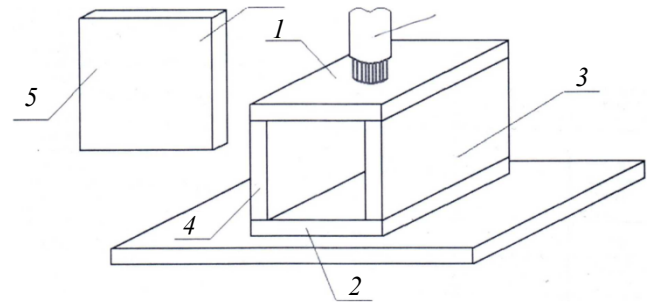


Рис.2. Схема одностороннего виброволнового нагружения модели (образца) виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом

Результаты изменений микротвердости материала  $H_{\mu}$  элементов «корпусной» детали представлены в табл. 1.

1. Результаты изменения  $H_{\mu}$  отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, с	Изменение $H_{\mu}$ на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л'	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	-40,7	-86,7	-20,3	+51,3	-7,4	-9,6	+45,3	-76,6	2,7	-10,1	-0,7	-7,5
ЗОХГСА	10	-32,8	-2,4	+175,6	+71,5	+69,7	+9,8	-114	-73,8	-	-	-35,8	-8,4
АВТ1	60	-39,4	-62,5	-37,1	+13,8	-2,3	-23,7	-0,9	-68,8	+4,2	+17	-23,8	-52,5
ЗОХГСА	60	-16,9	+11,4	+186,6	+0,9	+64,5	-15,8	+106,6	-34,2	-	-	-42,2	-9,8
АВТ1	120	-19,5	-79,2	-69,4	-35,2	-62,8	-54	+34,3	-70,6	-10,3	-0,3	-195	-22,3
ЗОХГСА	120	+36,6	-45,3	+83,5	-3,3	-40,8	-32,8	-149,5	-66,8	-	-	-186,4	-159

По результатам проведённого эксперимента одностороннего виброволнового нагружения модели виброволновым (виброударным) многоконтактным инструментом (ШСУ) отмечено:

1. В основном снижение  $H_{\mu}$  для образцов.
2. При обработке 120 с преобладает снижение  $H_{\mu}$ . Лишь одно показание увеличилось для поверхности «4Л» образца из материала АВТ-1.
3. Существенное снижение  $H_{\mu}$  поверхности образца 6, изготовленного из материала 30ХГСА при обработке 120 с.
4. С увеличением t возрастает уровень снижения  $H_{\mu}$ .

Произведена обработка имитационной модели корпусной детали при отсутствии контактного виброударного нагружения среды стальных шаров или ШСУ с целью выявления виброволнового воздействия. Образец, (пустой) закреплённый на виброплощадке, подвергался вибрированию. Режимы колебаний:  $A = 2,5$  мм;  $f = 30$  Гц;  $t = 10$  мин.

Результаты измерений представлены в табл. 2.

2. Результаты изменения  $H_{\mu}$  отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, мин	Изменение $H_{\mu}$ на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	-30,4	-14,38	+29,1	-14,28	+7,26	+33,94	-14,28	-19,9	-4,48	+21,16	-20,96	+23,2
30ХГСА	10	-39,3	-21,3	+113,4	+8,4	-88,8	-3,6	-31,5	-32,1	-	-	-47,4	-64,8

По результатам эксперимента отмечен увеличенный разброс значений  $H_{\mu}$  для материала АВТ-1. Более стабильны результаты измерения  $H_{\mu}$  для стали 30ХГСА, где отмечается снижение  $H_{\mu}$ .

Произведена обработка «корпуса», закреплённого на виброплощадке с заполнением внутренней полости стальными шарами на 80... 90 % объёма (рис. 3). Далее произведена повторная обработка с поворотом образца на 180°.

Режимы обработки те же, что и при обработке «пустого» образца:  $A = 2,5$  мм;  $f = 30$  Гц;  $t = 10$  мин.

Результаты изменений  $H_{\mu}$  представлены в табл. 3.

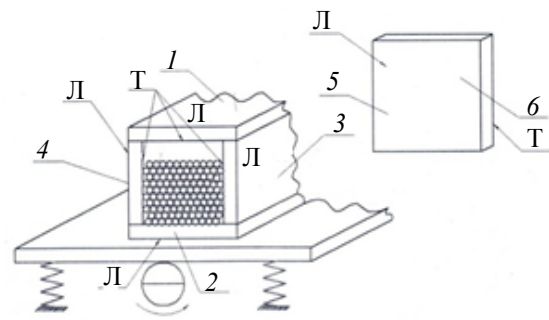


Рис. 3. Схема обработки «корпуса», закреплённого на виброплощадке с заполнением внутренней полости стальными шарами.

3. Результаты изменения  $H_{\mu}$  отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, мин	Изменение $H_{\mu}$ на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	10	28,22	19,92	53,76	54,66	19,48	50,48	55,22	83,84	3,84	55,58	83,04	28,72
30ХГСА	10	108,9	43,5	32,4	58,1	132,6	-23,4	93,9	42	-	-	124	214,1
После поворота корпуса на 180°													
АВТ-1	10	-9,66	74,84	-25,04	1,34	22,42	20,66	5,84	-14,3	30,14	37,62	-26,9	27,24
30ХГСА	10	36,1	96,4	-48	131,8	-60	167,2	-19,5	70	-	-	13,7	47,8

В отличие от обработки «пустой» коробки, при обработке с заполнением рабочей средой (стальные шары) на 80...90% объёма полости («коробки»), отмечено повышение  $H_{\mu}$  всех поверхностей (сторон образца 1, 2, 3, 4, 5, 6) в том числе «Л» и «Т». Это объясняется соударением частиц среды, сопровождаемых пластической деформацией и взаимодействием ударных волн.

По результатам табл. 3 представлены диаграммы изменения  $H_{\mu}$  отдельных элементов корпусной детали.

После продолжения обработки образца и поворота его на 180° отмечены разные значения  $H_{\mu}$  в виде его изменения преимущественно лицевых поверхностей (Л).

С целью проверки изменений  $H_{\mu}$  при разностороннем виброволновом воздействии на корпусной образец (внутри полый – «пустой») произведена ВиО образца в среде стальных шаров  $d = 7$  мм в течение 60 мин в рабочей камере. Схема нагружения и в «свободном состоянии» (без закрепления).

Результаты изменений  $H_{\mu}$  представлены в табл. 4.

4. Результаты изменения  $H_{\mu}$  отдельных элементов корпусной детали (имитационной модели)

Материал образца	t, мин	Изменение $H_{\mu}$ на поверхности образцов (Л – лицевая, Т – тыльная), МПа											
		1Л	1Т	2Л	2Т	3Л	3Т	4Л	4Т	5Л	5Т	6Л	6Т
АВТ-1	60	72,86	24,04	68,5	53,5	110,1	47,1	86,5	1,3	157,8	5,6	82,4	0,2
30ХГСА	60	53,8	120,9	145,5	126,3	226,3	52,8	326,5	140,6	-	-	199	213,8

В качестве следующего примера, раскрывающего особенности взаимодействия волн деформаций при нагружении пакета образцов выполнены комплексные исследования величин виброволнового нагружения на микро-

твердость, остаточные напряжения и усталостную долговечность.

Известно, что физико-механические свойства (микротвердость, остаточные напряжения), структура являются важнейшими пока-

зателями, характеризующими состояние материала детали и оказывающими влияние на ее эксплуатационные свойства (усталостную прочность, размерную стабильность и др.).

Виброударные воздействия на тела и среды различных характеристик сопровождаемые виброволновыми процессами могут оказаться достаточно эффективными при решении широкого спектра технологических задач. Представленные ниже результаты исследований подтверждают эти предположения.

Обработке подвергались плоские образцы (рис. 4) из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава Д16Т, собранные в пакеты и зафиксированные технологическим крепежом (рис. 5). Обработка осуществлялась в среде стальных шаров из закаленной стали ШХ15 (62...64 HRC). Режимы виброволнового нагружения: амплитуда колебаний  $A = 2,5$  мм; частота  $f = 30$  Гц; продолжительность обработки  $t = 30$  и 60 мин. Оценка изменения уровня остаточных напряжений осуществлялась по величине прогиба  $f$  образца с помощью специального устройства. Измерение  $f$  осуществлялось с лицевой и тыльной стороны (соответственно стороны 1 и 2 для каждого образца). Результаты исследований представлены в таблицах и характеризуют дифференцированное изменение величины прогиба  $f$  пакета образцов при времени обработки 30 и 60 мин.

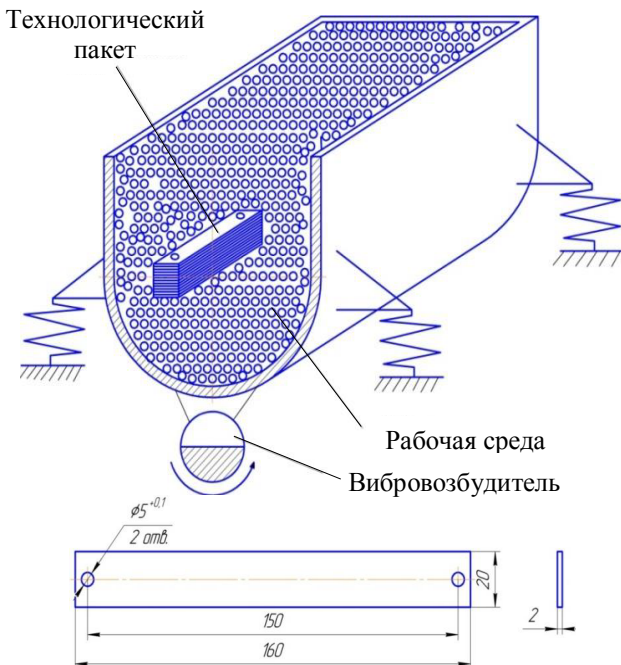


Рис. 4. Схема нагружения и общий вид образца

Представим также результаты обработки пакета плоских образцов из разнородных матери-

алов (с различными механическими свойствами), при различном размещении образцов в пакете.

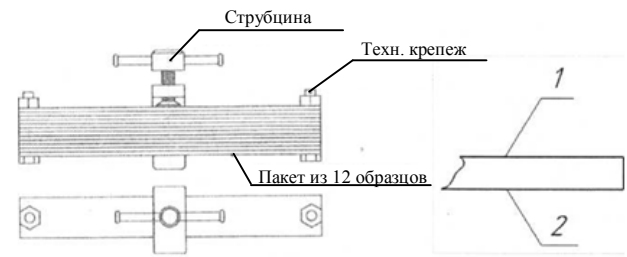


Рис. 5. Схема пакета образцов

Целью эксперимента является изучение особенностей распространения ударных волн в пакете набранных из различных материалов, в частности алюминиевого сплава АМг6 и стали 30ХГСА.

Обработке подвергались плоские образцы (см. рис. 5) из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава АМг6. Образцы были собраны в пакеты различных размеров и зафиксированы технологическим крепежом (см. рис. 6). Обработка осуществлялась в среде стальных шаров из закаленной стали ШХ15  $d = 7$  мм, при свободной загрузке (62...64 HRC<sub>Э</sub>) (см. рис. 5). Режимы обработки: амплитуда колебаний  $A = 2,5$  мм; частота  $f = 30$  Гц; продолжительность обработки  $t = 30$  и 90 мин.

Оценка результатов эксперимента осуществлялась измерением микротвёрдости  $H_{\mu}$  с двух сторон: лицевой нагруженной прямой стороны и тыльной противоположной стороны. Измерение величины прогиба  $f$  осуществлялось с лицевой стороны и тыльной (соответственно стороны 1 и 2 для каждого образца).

Результаты исследований представлены в табл. 5 для четырех пакетов, набранных из различно расположенных образцов в пакете.

В таблице показаны номера образцов, их расположение в пакете; справа для каждого образца указаны значения изменения микротвёрдости (верхнее – лицевая сторона; нижнее – тыльная сторона); знаком «+» отмечено увеличение  $H_{\mu}$ ; «-» уменьшение  $H_{\mu}$ .

Анализируя полученные результаты, установлено следующее: при обработке в течение 30 мин отмечено повышение  $H_{\mu}$  для всех образцов из АМг6 (исключение: в пакете №3 при верхнем расположении образца из АМг6 повышение  $H_{\mu}$  оказалось одинаковым для лицевой и тыльной поверхности). Для образцов из стали 30ХГСА в пакете №3 (нижнее расположение) отмечено снижение  $H_{\mu}$ ; то же самое отмечено в пакете №4 при среднем располо-

жении стального образца. Для сравнения исследована обработка пакета образцов из одинакового материала (алюминиевого сплава АВТ-1).

**5. Результаты исследований для четырех пакетов, набранных из различно расположенных образцов в пакете**

30 мин			90 мин		
№1	Сталь 30ХГСА	74	№1	Сталь 30ХГСА	-24
		5			-20
№1	Алюминиевый сплав АМг6	30	№1	Алюминиевый сплав АМг6	79
		60			104
№2	Сталь 30ХГСА	37	№2	Сталь 30ХГСА	-67
		109			-2
№2	Алюминиевый сплав АМг6	104	№2	Алюминиевый сплав АМг6	212
		21			55
№3	Сталь 30ХГСА	67	№3	Сталь 30ХГСА	-31
		49			-147
№3	Алюминиевый сплав АМг6	19	№3	Алюминиевый сплав АМг6	106
		56			76
№4	Алюминиевый сплав АМг6	19	№4	Алюминиевый сплав АМг6	119
		19			57
№5	Алюминиевый сплав АМг6	2	№5	Алюминиевый сплав АМг6	0
		39			43
№4	Сталь 30ХГСА	-143	№4	Сталь 30ХГСА	-57
		-53			-79
№7	Сталь 30ХГСА	67	№7	Сталь 30ХГСА	47
		41			202
№6	Сталь 30ХГСА	-133	№6	Сталь 30ХГСА	-133
		-165			-60
№6	Алюминиевый сплав АМг6	41	№6	Алюминиевый сплав АМг6	50
		115			35

Результаты обработки представлены на рис. 7, 8. Пакеты набраны из образцов различных размеров (образцы-призмы имели размеры 10×10×25 мм; образцы пластины – 10×10×2 мм). На образцах представлены результаты изменения состояния материала в виде увеличения «+» или снижения «-» микротвердости.

На рис. 6 представлена схема компоновки из четырех образцов при расположении двух «тонких» образцов – 10×10×2 мм под двумя большими (призматическими) – 10×10×20 мм.

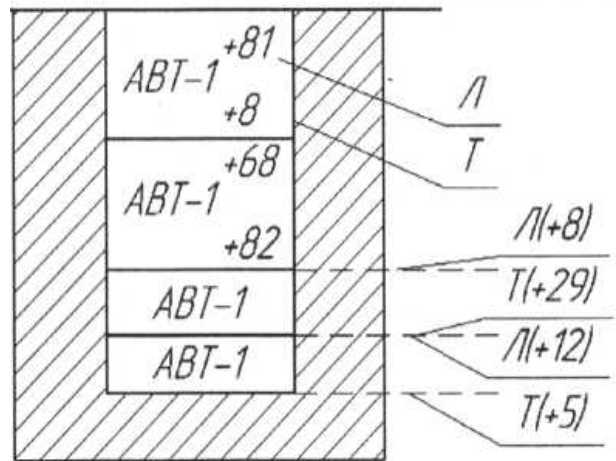


Рис. 6. Схема компоновки из четырех образцов из алюминиевого сплава АВТ-1

Для рассматриваемого пакета образцов характерно повышение  $H_{\mu}$  «Л» и «Т» сторон (различного уровня). Отмечено у второго по высоте образца превышение  $H_{\mu}$  тыльной поверхности по сравнению с лицевой («Т» + 82; «Л» + 68).

Для расширения вариантов компоновки пакетов образцов проведены экспериментальные исследования виброволнового нагружения пакета из трёх «тонких» образцов (10×10×2 мм) из алюминиевого сплава АВТ-1. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.

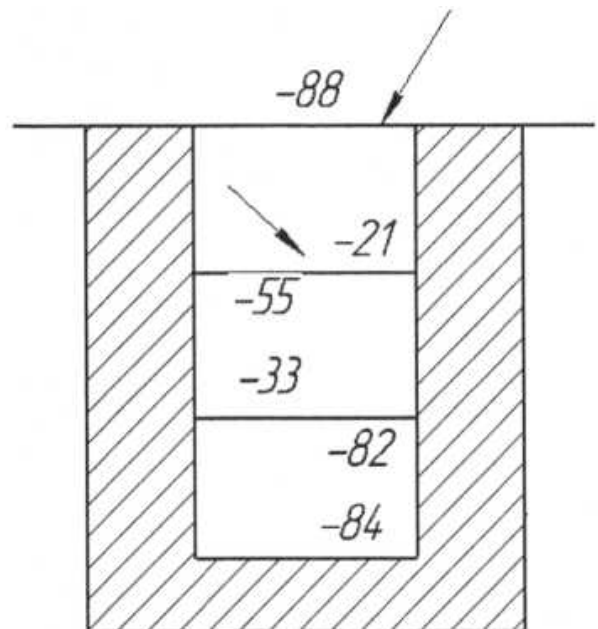


Рис. 7. Схема виброволнового нагружения пакета из трёх «тонких» образцов (10×10×2 мм) из алюминиевого сплава АВТ-1

Особенностью результатов обработки пакета тонких образцов является снижение  $H_{\mu}$  ли-

цевой и тыльной сторон всех образцов, что представляет интерес для технологических операций, например, вибрационной стабилизирующей обработки.

Одним из важных аспектов полученных результатов следует отметить роль волнового нагружения на изменение состояния материала. В частности, при верхнем расположении более мягкого образца из алюминиевого сплава, ниже расположенный образец из стали (более твердый) показал изменение микротвердости.

Отмечено влияние продолжительности виброволнового нагружения на изменение микротвердости. При этом имеет место, как повышение, так и снижение указанных показателей.

Наиболее заметное повышение  $H_{\mu}$  отмечено у образцов больших размеров и массы. Увеличение времени обработки  $t$  (от 30 и 60 с) сопровождается увеличением  $f$  (прогиба).

Анализируя полученные результаты, отмечено следующее: 70 % образцов из стали 30ХГСА при  $t = 30$  мин показали отсутствие изменений величины прогибов (возможная причина в незначительной продолжительности виброволнового воздействия). Результаты обработки образцов из стали 30ХГСА при  $t = 60$  мин, показывают преимущественно увеличение прогибов, как по тыльной, так и по лицевой стороне. Результаты обработки образцов из сплава Д16 при  $t = 60$  мин, показывают увеличение прогибов либо отсутствие изменений, как по тыльной, так и по лицевой стороне в равной пропорции.

Уместно отметить, что распространение и взаимодействие волн в слоистых структурах (пакетах) материалов представляет значительный интерес. В этом случае имеют место сложные явления, связанные с интерференцией, дифракцией, трансформацией различных типов волн друг в друга на границах нагружаемых образцов сжатого пакета, результаты которых представляют интерес при решении технологических задач.

В заключение комплекса экспериментальных исследований, в результате которых получена информация об изменении физико-механических параметров материала образцов, проведены испытания усталостной долговечности. Усталостные испытания проведены на усталостной машине УИМ-5 конструкции ЦНИИТМАШ. Контроль измерений усталостной долговечности осуществлялся количеством циклов, нагружаемых образцов до разрушения (табл. 6).

### 6. Результаты испытаний усталостной долговечности 30ХГСА

№ образца	Количество циклов до разрушения $N_{ц}$ . Исходные	$N_{ц}$ , после упрочнения образца	Изменение $N_{ц}$ ( $\pm$ )	$H_{\mu}$ ( $\pm$ )	$\sigma_0$ ( $\pm$ )
30ХГСА					
1	4 000	4 000	0	18,6	0
2	5 000	7 000	2 000	23	3,52
3	3 000	5 000	2 000	138,6	0
4	7 000	33 000	2 600	45	0
5	23 000	26 000	3 000	82	0
Д16Т					
1	13000	10000	-3000	-44,5	2
2	5000	110000	105000	31,3	0,59
3	9000	18000	9000	-27,8	0
4	14000	39000	25000	-7	1,81
5	11000	25000	14000	31,1	0,59

### Заключение

Представлены результаты виброволнового воздействия на слоистый пакет образцов. Реакция изменения состояния материала образцов, расположенных на разном расстоянии от контактного нагружения, различна.

Отмечаются преимущественные повышения микротвердости материала образцов, в меньшей степени изменяются остаточные напряжения.

По результатам исследований усталостной долговечности отмечены следующие особенности: образцы, воспринимающие контактное нагружение №1, показали снижение или отсутствие изменения (по сравнению с исходным) значений усталостной долговечности. Нижележащие в пакете образцы (прежде всего нижние) показали более высокие результаты повышения усталостной долговечности. Объяснением этому является, наличие деформации верхнего образца при контактном взаимодействии, разрушение при этом целостности структуры тонкого поверхностного слоя первого образца.

Нижележащие образцы подвержены лишь волновому воздействию, сопровождающегося повышением микротвердости, образованием сжимающих остаточных напряжений, однако структурное состояние материала этих образцов не подвержено разрушению и сохраняет более стабильное состояние по сравнению с образцами, подвергаемыми контактному

деформирующему разрушению.

Реализация данных научных исследований нашла отражение в виде разработки технологий, специального оборудования, инструментов, обрабатывающих сред и технологических жидкостей (ТЖ) деталей летательных аппаратов (в том числе крупногабаритных – панели крыла и фюзеляжа, лонжеронов лопасти несущего и рулевого винта вертолета, силовых деталей); деталей автомобилей, тракторов и их двигателей – коленчатые и распределительные валы, шатуны, карданные валы и др.; бандажей колесных пар подвижного состава железных дорог; деталей подшипников качения – кольца, ролики, сепараторы [6 – 7].

В настоящее время ведутся исследования ВиСО деталей летательных аппаратов (на примере деталей вертолета и радиоантенных устройств). Установлено в частности, что при виброволновом воздействии на образцы (детали) отмечаются изменения как лицевой (нагружаемой) стороны (поверхности), так и противоположной (тыльной) стороны, которая не подвергалась контактному нагружению. При определенных условиях (режимах) виброволнового нагружения имеют место более существенные изменения микротвердости тыльной стороны по сравнению с лицевой поверхностью. Выявленные особенности изменяют сложившееся представление о механизме динамических методов упрочнения ППД, когда рассматриваются лишь контактные воздействия ударного нагружения и деформация поверхностного слоя, считая, что нижележащие слои материала сохраняют исходное состояние [8].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов, О.Д., Манжосов, В.К. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М: Наука, 1985. – 342 с.
2. Аврорин, Е.Н., Водолага, Б.К., Симоненко, В.А., Фортгов, В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // РАН. Успехи физических наук. – 1993. – Т.163. – №5. – С. 16.

3. Меерс, М.А., Мурр, Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. – М.: Metallurgy, 1984. – 482 с.

4. Ахмадеев, Н.Х., Нигматулин, Р.И. Динамическое откольное разрушение в волнах разгрузки. ПМТФ, МГУ, 1981. – 121 с.

5. Ганиев, Р.Ф., Кобаско, Н.Ф., Фролов, К.В. Волновая технология в упрочнении материалов // Научно-технический прогресс в машиностроении. – 1989. – Вып. 18. – 72 с.

6. Бабичев, А.П., Бабичев, И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 621 с.

7. Бабичев, А.П., Мотренко, П.Д. и др. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2003. – 191 с.

8. Бабичев, И.А. Модель передачи ударного импульса в ШСУ/ Вопросы вибрационной технологии // Межвуз. сборник. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ. – 1991. – С. 9–21.

## REFERENCES

1. Alimov, O.D., Manjosov, V.K. *Deformation Wave Propagation in Shock Systems*. – M: Science, 1985. – pp. 342.

2. Avrorin, E.N., Vodolaga, B.K., Simonenko, V.A., Fortov, V.E. Power impact waves and experimental states of matter // *RAS. Physical Sciences Successes*. – 1993. – Vol.163. – №5. – pp. 16.

3. Meers, M.A., Murr, L.E. *Impact Waves and Phenomena of High-Speed Metal Deformation*. – M.: Metallurgy, 1984. – pp. 482.

4. Akhmadeev, N.H., Nigmatulin, R.I. *Dynamic Breaking off Destruction in Unloading Waves*. PMTF, MSU, 1981. – pp. 121.

5. Ganiev, R.F., Kobasko, N.F., Frolov, K.V. Wave technology in material strengthening // *Scientific-Technical Progress in Mechanical Engineering*. – 1989. – Edition 18. – pp. 72.

6. Babichev, A.P., Babichev, I.A. *Fundamentals of Vibration Technology*. – Rostov-upon-Don: DSTU, 1999. – pp. 621.

7. Babichev, A.P., Motrenko, P.D. et al. *Finish-Strengthening of Parts by Multicontact Vibroimpulsive Tool*. – Rostov-upon-Don: Publishing house of DSTU, 2003. – pp. 191.

8. Babichev, I.A. Model of Shock Pulse Transmission in ShSU/ *Problems of Vibration Technology* // Inter-College Proceedings. Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU. – 1991. – pp. 9–21.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдес