

УДК 621.9.01: 621.921.34

**В. И. Аверченков**, д-р тех. наук, проф., **В. В. Надуваев**, к. т. н., доцент,**Е. Н. Фролов**, к. т. н., доцент

Брянский государственный технический университет, Россия

Тел./факс: +7(4832)58-82-20; E-mail: aver@tu-bryansk.ru

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Рассмотрены перспективные комбинированные упрочняюще-отделочные процессы на основе электрофизических методов с последующей отделочной обработкой инструментом из синтетических сверхтвердых материалов, позволяющие управлять металлофизическими характеристиками поверхностных слоев деталей машин.*

**Ключевые слова:** отделочно - упрочняющая обработка, электрофизические методы, качество, сверхтвердые материалы

**V. I. Averchenkov, V. V. Naduvaem, E. N. Frolov**

### ENSURING QUALITY AND DURABILITY THE SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS

*Prospective combined ProcName finishing processes on the basis of the electrationsa methods with the subsequent finishing treatment tool of synthetic superhard materials, allowing you to control metal-physical characteristics of surface layers of machine parts.*

**Key words:** finishing - strengthening processing, electrical methods, quality, superhard materials

Качество и продолжительность эксплуатации наиболее ответственных деталей машин в значительной степени определяется состоянием и свойствами поверхностного слоя рабочих поверхностей, подвергаемых различным видам финишной обработки. В последние годы в качестве окончательной обработки ответственных поверхностей деталей машин наиболее перспективными являются комбинированные упрочняюще-отделочные процессы, которые создаются на базе электрофизических методов обработки, позволяющих наиболее гибко управлять состоянием и свойствами рабочих поверхностей слоев тяжело нагруженных деталей. Предлагаемые метод финишной обработки решающим образом влияют на такие служебные и эксплуатационные свойства деталей, как износостойкость, сопротивление усталости, контактная жесткость, виброустойчивость и многие другие.

В предлагаемых исследованиях рассматривалась комбинированная упрочняюще-отделочная обработка на основе лазерного или электромеханического упрочнения и последующей отделочной обработки с применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов, в частности, алмазным выглаживанием. На стадии упрочняющей обработки представлялось возможным управлять металлофизическими характеристиками поверхностных слоев деталей машин, например, твердостью, а на стадии отделочной обработки - параметрами, определяющими микрогеометрию. Одним из недостатков лазерного упрочнения является ухудшение поверхности, особенно, если упрочнение производится с режимами, вызывающими частичное или полное оплавление поверхностного слоя. Это вызывает, если принять во внимание, значительное увеличение микротвердости упрочненных поверхностей, повышенный износ сопряженной поверхности контртел. Так, интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр 05Ц5С5, сопрягаемых с цилиндрическими образцами из стали 45, упрочненных лазерной обработкой (испытания проводились при смазке маслом «Индустиральное 12», при скорости скольжения 0,9 м/с и давлении 2,2 МПа) составила от  $1,24 \cdot 10^{-6}$  до  $3,32 \cdot 10^{-7}$  (табл. 1).

Диаметр пятна контакта лазерного луча с обрабатываемой поверхностью составлял 4 мм. Образцы изготавливались из стали в стадии поставки.

Дисперсионный анализ экспериментальных данных (табл. 2) показывает, что интенсивность изнашивания контртел из бронзы (образцы, упрочненные лазерной обработкой, за время испытания практически не изнашивались) зависит в основном от плотности энергии излучения  $Q$  наименьшая интенсивность изнашивания контртел  $J = 2,82 \cdot 10^{-7}$  соответствует  $Q_1 = 1,3$  Дж/мм<sup>2</sup>, влияние фактора  $\Pi$  и совместное влияние факторов  $Q\Pi$  оказываются незначимыми даже на уровне значимости  $\alpha = 0,10$ . Причем 64,45 % вариации интенсивности изнашивания  $J-10^{-9}$ , по данным корреляционного анализа, связано с параметром шероховатости  $R_{max}$  упрочняемых образцов.

Таблица 1 - Шероховатость упрочненных лазерной обработкой поверхностей образцов из стали 45  $R_{max}$ , мкм (в скобках) и интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр 05Ц5С5  $J-10^{-9}$ , мкм/км

Плотность энергии излучения ( $Q$ )	Коэффициент перекрытия пятен и ( $R_{max}$ )	
	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$
$Q_1 = 1,3$ Дж/мм <sup>2</sup>	331,85	296,78
	281,01	217,91
	(3,28)	(2,78)
$Q_2 = 2,5$ Дж/мм <sup>2</sup>	1721,15	1897,15
	1242,51	2049,05
	(8,25)	(5,94)

Таблица 2 - Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник влияния	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
Факторы:	1	4173608,3	41739-608,3	128,52
Взаимодействие	1	96881,4	96881,4	2,98
Случайные факторы (ошибка)	4	144913,0	144913,0	4,46
Сумма	4	129887,9	32472,0	-
Сумма	7	4545290,7	-	-

Примечание. Критическое значение F-отношения:  $F_{1,4} 0,05 = 7,71$ ;  $F_{1,4} 0,10 = 4,54$ .

После последующей механической обработки упрочненных лазерной обработкой образцов накатыванием и алмазным виброполированием, интенсивность изнашивания контртел из бронзы значительно уменьшилась (в отдельных случаях на несколько порядков) и составила от  $2,19 \cdot 10^{-7}$  до  $5,8 \cdot 10^{-11}$  (табл.3).

Накатывание образцов из стали 45 диаметром 40 мм осуществлялось роликом с каплевидным контактом (диаметр ролика  $\rho = 1$  мм, тангенс угла вдавливания  $t\phi = 0,009$ , усилие деформирования  $P = 800$  Н, скорость обкатывания  $v = 56$  м/мин, подача  $S = 0,096$  мм, число рабочих ходов  $i = 1$ ). Алмазное виброполирование осуществлялось без смазочно-охлаждающей жидкости.

Параметр шероховатости  $R_{max}$  образцов после накатывания уменьшился в среднем в 2 раза - с 3,26-15,98 до 1,49-5,64 мкм, после алмазного виброполирования - в среднем в 2,3 раза - с 2,83-8,81 до 1,31-5,92 мкм.

Как показывает дисперсионный анализ данных табл. 4, наибольшее влияние на интенсивность изнашивания контртел из бронзы оказывает характер перекрытия пятен

при лазерном упрочнении образцов (в среднем, фактору  $\Pi_2 = 0,5$  соответствует интенсивность изнашивания  $J$  на порядок меньше, чем для случая, когда  $\Pi_1 = 0$ ), совместное влияние факторов QПМ наименьшая величина  $J$  соответствует следующим сочетаниям факторов ( $Q_1\Pi_1M_2$ ,  $Q_1\Pi_1M_1$ ,  $Q_1\Pi_2M_2$  и  $Q_1\Pi_1M_2$  для которых среднее значение  $J = 1,88 \cdot 10^{-10}$ , что на несколько порядков меньше, чем для остальных сочетаний).

Таблица 3 - Интенсивность изнашивания контртел из бронзы Бр 05Ц5С5  $J \cdot 10^{-9}$ , трущихся в паре с упрочненными лазерной обработкой образцами из стали 45

Плотность энергии излучения ( $Q$ )	Механическая обработка			
	накатывание ( $M_1$ )		алмазное выглаживание ( $M_2$ )	
	Коэффициент перекрытия пятен ( $\Pi$ )			
	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$	$\Pi_1 = 0$	$\Pi_2 = 0,5$
$Q_1 = 1,3 \text{ Дж/мм}^2$	108,150	162,824	0,132	0,083
	15,113	93,170	12,256	0,058
$Q_2 = 2,5 \text{ Дж/мм}^2$			55,742	0,067
				0,482
			186,976	0,157
			219,411	

Влияние фактора  $Q$  оказывается менее существенным (в среднем, когда образцы из стали 45 упрочняются на уровне плотности энергии излучения  $Q_1 = 1,3 \text{ Дж/мм}^2$ , интенсивность изнашивания контртел из бронзы в 2 раза меньше) и зависит от метода последующей механической обработки стальных образцов (наименьшая интенсивность изнашивания соответствует сочетанию факторов  $Q_1M_2$ ).

Таким образом, последующая механическая обработка упрочненных лазерной обработкой поверхностей деталей способствует значительному повышению (для оптимальных условий лазерного упрочнения на несколько порядков) износостойкости сопрягаемых деталей и пары трения в целом. Алмазное виброполирование является предпочтительным видом обработки, однако преимущества накатывания в ряде случаев неоспоримы, например, в случае лазерного легирования, когда необходимо полностью сохранить упрочненный слой.

Таблица 4 - Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник влияния	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
Факторы:				
$Q$	1	6062,6	6062,6	8,07*
$\Pi$	1	32149,1	32149,4	42,77**
$M$	1	98,9	98,9	<1
Взаимодействия:				
$Q\Pi$	1	1911,0	1911,0	2,54
$QM$	1	15704,7	15704,7	20,89**
$\Pi M$	1	565,5	565,5	<1
$Q\Pi M$	1	25265,5	25265,5	33,62**
Случайные факторы (ошибка)	8	6012,7	751,6	-

Примечания: \* - то же на уровне  $\alpha = 0,05$ ;  
 \*\* - влияние фактора или взаимодействия значимо на уровне  $\alpha = 0,01$ ;

Аналогично тому, как проводилась импульсная лазерная обработка, была осуще-

ствлена импульсная электромеханическая обработка (ЭМО). Процесс ЭМО характеризуется, в частности, локальным нагревом металла поверхностного слоя заготовки в месте ее контакта с инструментом, через который пропускается электрический ток большой силы и низкого напряжения. Электроконтактный нагрев обуславливается выделением тепла  $Q$  на участке цепи, обладающем электросопротивлением  $R_{ЭЭ}$ , при протекании тока  $J_{ЭФФ}$  в течение импульса длительностью  $t$ , т.е.:

$$Q = \int_0^t \int_0^T J_{ЭФФ}^2(t) R_{ЭЭ} T dT dt, \quad (1)$$

где  $J_{ЭФФ}$  - эффективное значение тока;  $R_{ЭЭ}$  - активное сопротивление участка цепи между электродами контактной машины;  $t$  и  $T$  - координаты времени и температуры.

Так как технологический процесс ЭМО относительно длительный, следует учитывать также условия теплоотвода и связанные с этим потери тепла. Максимальная температура нагрева детали в месте подвода тока при ЭМО должна быть такой, чтобы обеспечивались необходимые глубина и твердость упрочненного слоя, компенсировались теплоотвод и в обрабатываемую заготовку, инструмент и теплопередача в охлаждающую жидкость.

Активное электросопротивление  $R_{ЭЭ}$  при ЭМО, если пренебречь электросопротивлением материала инструмента и остальных участков цепи, по которой подводится ток, можно представить как:

$$R_{ЭЭ} = R_K + R_M, \quad (2)$$

где  $R_K$  - электросопротивление подвижного контакта «роликовый инструмент - вращающаяся заготовка»;  $R_M$  - электросопротивление материала детали на поверхности упрочненного слоя. Составляющая  $R_K$  зависит от изменения только температурного коэффициента удельного электросопротивления материала, а так же глубины слоя, и в установившемся процессе ЭМО будет мало изменяться. Сопротивление  $R_M$  будет зависеть от вида материалов контактирующих поверхностей, размеров площади этой поверхности, структуры поверхностного слоя инструмента и детали (наличия поверхностных окислов, загрязнений, макро- и микрогеометрии поверхностей и др.), величины давления и температуры и др.

Обеспечить стабильные значения контактного сопротивления, а значит, температуры нагрева и глубины упрочняемого слоя, возможно различными путями. В частности, это может достигаться пропусканием тока по импульсной схеме. Схема импульсного режима включает перегрев токопроводящих микроконтактов, в которых из-за случайных попаданий на поверхность деталей окислов, загрязнений, местного рельефа поверхностей, загрязнения инструмента в процессе ЭМО и т.п. возможно нарастание мгновенной плотности тока до значений  $10... 100 \text{ A/cm}^2$ , что может вызвать подплавление поверхностей, испарение металла и выплески его из-под инструмента, появление глубоких впадин и т.д.

Импульсная схема пропускания тока предусматривает определенную длительность импульсов тока  $t_{имп}$  и пауз между ними  $t_{пауз}$ . Это способствует перераспределению тепла в моменты пауз во всех приконтактных объемах, стабилизирует сопротивление  $R_{ЭЭ}$  к моменту пропускания очередного импульса тока. Выбор  $t_{имп}$  и  $t_{пауз}$  будет влиять не только на максимальную температуру нагрева материала слоя и стабильность процесса ЭМО, но и на глубину слоя, площадь пятна контакта, производительность и экономические по-

казатели упрочнения. Значения  $t_{\text{имп}}$  и  $t_{\text{пауз}}$  для конкретных деталей следует выбирать экспериментально, взяв за основу рекомендации по выбору  $t_{\text{имп}}$  и  $t_{\text{пауз}}$  для импульсной и контактной шовной сварки, а так же при электроконтактной наварке порошковых материалов.

Изменяя длительность электромеханических импульсов и пауз между ними, а так же скорость перемещения заготовки относительно инструмента, удается получить упрочненные поверхности с регулярной микротвердостью. Как показали предварительные выполненные исследования, поверхностная микротвердость упрочненных участков после ЭМО на деталях их стали 45 составила 6532-7910 МПа. Максимальное упрочнение наблюдалось до глубины 0,4-0,8 мм, переходный слой - до 2 мм, что позволяет проводить последующую обработку шлифованием и другими методами с применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов.

Анализ микроструктуры упрочненного слоя показал, что она имеет характерное игольчатое строение, как у мартенсита после закалки. Микростроение переходного слоя характеризуется зернистой неравноосностью и резко отличающейся микротвердостью в зависимости от природы зерна. Так, ферритные зерна упрочнялись до 3000-3470 МПа, а исходные перлитные, имеющие тросто-сорбитное строение, - до 4740-6350 МПа. При этом микротвердость исходного состояния стали составляла 2200-2600 МПа.

Для оценки прирабатываемости поверхностей трения после ЭМО было выполнено сравнение с комбинированной обработкой, основанной на химико-термическом воздействии (цементацией).

Исследования проводились по плану двухфакторного эксперимента с двумя повторениями. В качестве первого фактора использовался метод упрочняющей обработки цилиндрических образцов  $M_4$ , варьируемой на двух уровнях (цементация и электромеханическая обработка), в качестве второго фактора - метод отделочной обработки  $M_0$ , так же варьируемый на двух уровнях (шлифование и алмазное выглаживание).

Цементируемые цилиндрические образцы изготавливались из легированной стали, содержащей 3 % хрома и 0,2 % углерода, образцы, подвергаемые электромеханическому упрочнению, - их легированной стали, содержащей 1 % хрома, 2 % никеля и 0,4 % углерода. Электромеханическому упрочнению образцов предшествовала их объемная закалка (32-38 HRC). Перед алмазным выглаживанием цилиндрические образцы подвергались шлифованию, а затем фрикционному меднению.

Нанесение фрикционных медных пленок, с одной стороны, интенсифицировало процесс алмазного выглаживания, поскольку снижало коэффициент трения между алмазным индетором и обрабатываемой поверхностью, и, с другой стороны, улучшало процесс приработки трущихся пар, способствуя их переходу в режим избирательного переноса.

Геометрические параметры качества рабочих поверхностей цилиндрических образцов ( $Ra$ , радиус скругления вершин неровностей  $\rho$ , безразмерный комплекс Крагельского-Комбалова  $\Delta = R_{\text{max}}/bp^{1/\nu}$ , где  $b$  и  $\nu$  параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой профиля неровностей) приведены в табл. 5.

Изнашивание образцов выполнялось по схеме «Вал - частичный вкладыш» на машине трения СМЦ-2 при скорости скольжения 107 м/мин и давлении 150 МПа в условиях граничного трения. Материал вкладышей - бронза БР 010ОС10. Длительность испытания на изнашивание составляла 24 часа. Рабочая поверхность вкладышей подвергалась растачиванию до  $Ra$  0,8.

Экспериментальные данные, полученные в процессе исследований, представлены в табл. 6. Как показали результаты дисперсионного анализа (табл. 7), изменчивость ве-

личин, характеризующих линейную интенсивность изнашивания образцов, интенсивность изнашивания контртел и в целом пар трения по массе, в большой мере связана с методами отделочной обработки поверхностей трения образцов, чем с методами их упрочняющей обработки.

Таблица 5 - Геометрические параметры качества рабочих поверхностей цилиндрических образцов

Метод упрочняющей обработки резца	Параметры качества	Метод отделочной обработки поверхности трения резца			
		шлифование		алмазное выглаживание	
		до изнашивания	после изнашивания	до изнашивания	после изнашивания
Цементация	$Ra$ , мкм р, мкм $\Delta$	0,98 33,20 0,126	0,63 90,90 0,033	0,60 470,80 0,004	0,46 369,90 0,009
Электро-механическая обработка	$Ra$ , мкм р, мкм $\Delta$	1,00 34,60 0,121	0,67 85,30 0,035	0,76 37,60 0,091	0,71 103,70 0,023

Таблица 6 - Экспериментальные данные по величине износа элементов

Метод упрочняющей обработки образцов	Метод отделочной обработки		поверхности трения образца			
	шлифование		алмазное выглаживание			
	износ образца		износ контртела	износ образца		износ контртела
	в мкм	в мг		в мкм	в мг	в мг
Цементация	1,22 0,94	4,20 3,24	2,10 2,80	0,12 0,13	2,87 1,00	1,52 0,90
Электро-механическая обработка	0,42 0,61	1,70 2,02	1,35 2,02	0,14 0,30	1,14 0,47	0,77 1,07

Так, с методами отделочной обработки связано 69,15 % вариации величин, характеризующих линейную интенсивность изнашивания образцов, 41,3 % величин, характеризующих интенсивность изнашивания контртел по массе и 48,4 % величин, характеризующих интенсивность изнашивания по массе пар трения в целом. С методами упрочняющей обработки связано соответственно 6,4 %, 33,8 % и 33,6 % вариации рассматриваемых величин.

Выявленную закономерность влияния методов отделочной и упрочняющей обработки, безусловно, можно использовать в целях повышения износостойкости деталей машин.

Линейная интенсивность изнашивания образцов зависит также от взаимодействия исследуемых факторов  $M_4M_0$ , т.е. влияние метода упрочняющей обработки на линейную интенсивность изнашивания зависит от того, какому методу отделочной обработки подвергнута рабочая поверхность цилиндрического образца и, наоборот, влияние метода отделочной обработки зависит от того, каким методом был упрочнен образец (цементацией или электро-механической обработкой).

Таблица 7 - Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений величин от общего среднего	Средний квадрат отклонений величин от общего среднего	Отношение $F$
<b>Линейная интенсивность изнашивания образца <math>J</math></b>				
$M_4$	1	0,084	0,084	4,7
$M_0$	1	0,898	0,898	50,2
$M_4M_0$	1	0,245	0,245	13,7
Ошибка	4	0,071	0,018	-
Сумма	7	1,298	-	-
<b>Интенсивность изнашивания образца по массе <math>G</math></b>				
$M_4$	1	4,440	4,440	7,46
$M_0$	1	4,176	4,176	7,01
$M_4M_0$	1	0,151	0,151	<1
Ошибка	4	2,381	0,595	-
Сумма	7	11,149	-	-
<b>Интенсивность изнашивания контрол по массе <math>g</math></b>				
$M_4$	1	0,0406	0,0406	8,39
$M_0$	1	0,0496	0,0496	10,25
$M_4M_0$	1	0,0105	0,0105	2,17
Ошибка	4	0,0193	0,0048	-
Сумма	7	0,1201	-	-
<b>Интенсивность изнашивания пары трения по массе <math>G_T</math></b>				
$M_4$	1	0,245	0,245	8,95
$M_0$	1	0,353	0,353	12,89
$M_4M_0$	1	0,022	0,022	<1
Ошибка	4	0,109	0,027	-
Сумма	7	0,729	-	-

Обращает на себя внимание тот факт, что наименьший износ за время испытания имели цементируемые образцы, рабочая поверхность которых обработана алмазным выглаживанием. Очевидно, что именно данные образцы имели наибольший радиус скругления вершин неровностей  $\rho = 470,8$  мкм (см. табл. 5), и это обусловило благоприятные условия поверхностей трения [1].

Как показали приведенные исследования, наименьшие значения величин линейного износа образцов, контрол и в целом пар трения по массе соответствуют электромеханической обработке и алмазному выглаживанию. Так, суммарный износ пар трения по массе, у которых образцы подвергались электромеханической обработке и алмазному выглаживанию, соответственно, в 1,76 и 1,99 раза меньше, чем у пар трения, образцы которых цементировались и обрабатывались шлифованием [2].

По результатам выполненных исследований был проведен однофакторный эксперимент с двумя повторениями. Исследуемый фактор (метод упрочняющей обработки -  $M$ ) рассматривался на шести уровнях:  $M_1(\text{Ц}+\text{Ш})$  - цементация + шлифование;  $M_2(\text{Ц}+\text{АВ})$  - цементация + шлифование + алмазное выглаживание;  $M_3(\text{ЭМО}+\text{Ш})$  - электромеханическая обработка, проводимая с перекрытием пятен контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью + шлифование;  $M_4(\text{ЭМО}+\text{Ш})$  - электромеханическая обработка, проводимая без перекрытия пятен контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью + шлифование;  $M_5(\text{ЭМО}+\text{АВ})$  - электромеханическая обработка (проводимая по первому варианту) + алмазное выглаживание;  $M_6(\text{Ш}+\text{Л})$  - шлифование + лазерная обработка [3].

Обработке подвергались цилиндрические образцы диаметром 40 мм. Перед алмаз-

ным выглаживанием образцы подвергались фрикционному меднению. По экспериментальным данным определялась интенсивность изнашивания образцов: линейная и по массе, контртел - по массе, а так же рассчитывалась суммарная интенсивность изнашивания по массе для пары трения.

Как показали результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных по интенсивности изнашивания элементов пар трения (у которых образцы упрочнялись цементацией, электромеханической и лазерной обработками), электромеханическая обработка почти не уступает лазерной по влиянию на износостойкость трущихся пар. Парам трения, у которых образцы упрочнялись электромеханической и лазерной обработкой, соответствовала наименьшая линейная интенсивность изнашивания цилиндрических образцов  $1,7 \cdot 10^{-11}$  мкм/км (что в 60 раз меньше, чем для образцов, подвергаемых цементации и последующему шлифованию) и контртел по массе  $2,3 \cdot 10^{-8}$  мг/км (что в 2 раза меньше, чем для контртел, контактирующих с образцами, упрочняемыми цементацией с последующим шлифованием) [4].

Результаты выполненных исследований позволили также установить, что наряду с упрочняющей обработкой на износостойкость трущейся пары оказывает влияние метод отделочной обработки ее рабочих поверхностей. Так, пары трения, у которых рабочая поверхность цилиндрических образцов подвергалась алмазному выглаживанию, по сравнению со шлифованием, имели лучшие результаты по линейной интенсивности изнашивания [5].

Проведенные исследования показали, что лазерная и электромеханическая обработка вызывают существенное повышение микротвердости поверхностных слоев детали (до 9000 МПа), однако, величина упрочнения распространяется на определенную весьма ограниченную величину, поэтому в качестве отделочных операций наиболее целесообразно применять методы поверхностного пластического деформирования, в частности, алмазное выглаживание, что в целом позволяет снизить величину начального износа трущихся поверхностей на 30 % и в 2-3 раза сократить период их приработки [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Надуваев, В. В., Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и износостойкости детали машин / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Современные процессы механической обработки. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2009. – С. 98-106.
2. Надуваев, В.В., Процессы обеспечения износостойкости деталей машин / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Процессы механической обработки в машиностроении. – Житомир: ЖДГУ, 2011. – С. 227-237.
3. Надуваев, В.В., Прогрессивные технологии на основе комбинированной обработки / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Международная научно-техническая конференция. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 169 – 170.
4. Надуваев, В.В. Отделочно – упрочняющая обработка поверхностей сборочных единиц / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Международная научно-техническая конференция. – Уфа: «Аэтерна», 2014. – С. 35-38.
5. Аверченков, В. И. Технологическое обеспечение продолжительности эксплуатации тяжело нагруженных деталей машин и элементов производственной оснастки / В. И. Аверченков, В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Международная научно-техническая конференция. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 11-13.
6. Аверченков, В.И. Моделирование производственных систем / В. И. Аверченков, В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов // Научно-технические технологии на современном этапе развития машиностроения. – Москва: МАДИ, 2016. – С. 133-136.

Поступила в редколлегию 02.03.2017г.