

3. При вібраційній обробці поверхневого шару деталей значно знижується напруження текучості, що призводить до зменшення необхідного зусилля деформування, тобто до зниження енергозатрат технологічного процесу.

1. Губкин С.Н. Пластическая деформация металлов / С.Н. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 416 с. 2. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования / Е.П. Унксов. – М.: Машигиз, 1959. – 328 с. 3. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев. Е.А. Понов. – М.: Машиностроение, 1987. – 423 с. 4. Томлёнов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томлёнов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с. 5. Калинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Калинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с. 6. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 7. Дудников И.А. Упрочняющая обработка материала вибрационным деформированием / И.А. Дудников, А.И. Беловод, А.В. Горбенко, А.А.Дудников // *Вібрації в техніці та технологіях*. – № 1 (53). – Вінниця, 2009. – С.45–49. 8. Дудников И.А. Упрочнение поверхности деталей вибрационным методом / И.А. Дудников, А.А.Дудников А.И. Беловод // *Вібрації в техніці та технологіях*. № 4 (56) – Вінниця, 2009. – С. 82–85.

УДК 621.9.048

А.С. ЗУЕВ, И.М. ЛЕВИНСКАЯ, Л.М. ЛУБЕНСКАЯ

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

К ВОПРОСУ ТУРБОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

© Зуев А.С., Левинская И.М., Лубенская Л.М., 2011

Введение. На всех этапах развития современного машиностроения одной из наиболее важных задач является необходимость улучшения качества выпускаемых изделий, что в значительной степени определяется эффективностью отделочно-зачистных операций, трудоемкость которых в различных отраслях промышленности составляет от 10...20 % до 40...70 % общей трудоемкости изготовления деталей и имеет тенденцию к возрастанию [1–4].

При отделочно-зачистной обработке сложнопрофильных деталей использовать традиционные способы обработки практически невозможно из-за затрудненного доступа инструмента к обрабатываемой поверхности. Поэтому особенно широко применяют для этих целей методы обработки деталей в свободных абразивах, так как они позволяют во многих случаях механизировать обработку и повысить качественные показатели рабочих поверхностей, а также исключить или свести к минимуму непроизводительный ручной труд [5]. Одним из них является турбоабразивная обработка (ТАО).

Способ обработки деталей турбоабразивным методом заключается в том, что обрабатываемая деталь помещается в созданный абразивный псевдооживленный (кипящий) слой и в зависимости от ее формы, ей задают различные виды движений (вращательное, планетарное и др.) с высокой скоростью ($v_{ок} \geq 15-20$ м/с). Таким образом, в результате большого количества соударений частиц с поверхностью вращающейся детали происходит интенсивный сьем металла и формообразование нового микрорельефа поверхности [6, 7].

Результаты экспериментальных исследований [7, 8] показали, что, обрабатывая детали этим методом, можно выполнять такие операции:

- удаление с поверхностей заусенцев и округление острых кромок;
- очистка деталей сложной формы от остатков окалина после термообработки;
- финишная обработка деталей;
- декоративное шлифование;
- подготовка поверхности детали под нанесение различного рода покрытия;
- упрочнение поверхностей с одновременным снижением их шероховатости и др.

Примерами высокоэффективного применения технологии турбоабразивной обработки являются: обработка дисков турбин и газотурбинных двигателей после протягивания пазов под лопатки; обработка зубчатых колес после зубонарезания; обработка гребенок-ножей электрических стригальных машинок после прорезки зубьев; обработка декоративных автомобильных колесных колпаков, деталей люстр, деталей стиральных машин, термосов после штамповки; обработка поршневых колец после токарных операций; финишная обработка алмазных отрезных дисков с вскрытием алмазоносного слоя. Кроме того, для обработки крупных зубчатых колес и подобных им заготовок этот метод может оказаться единственно возможным [6–8].

Постановка проблемы. В результате исследований [6, 7] выделен ряд факторов, влияющих на эффективность ТАО. К ним относятся: скорость движения обрабатываемой детали; форма обрабатываемой детали; напор воздуха, подаваемого в установку на ожижение абразивного слоя; время обработки; зернистость и вид (марка) абразивного зерна; физико-механические свойства обрабатываемого материала (твердость, прочность и др.); характер исходной поверхности, подлежащей обработке (высота микронеровностей и их направление, способ предварительной обработки – точение, фрезерование, литье, штамповка и т.д.); схема расположения обрабатываемой детали по отношению к плоскости газораспределительной решетки (кинематическая схема обработки). Среди перечисленных факторов в этих работах частично рассматривается и влияние высоты слоя загруженного абразива и характеристик газораспределительных решеток.

Результаты исследований этого метода достаточно противоречивы [9–13], что связано, в том числе, и с тем, что исследования проводились на различном оборудовании, с различными рабочими средами и обрабатываемыми образцами. Поэтому для того, чтобы внедрить этот метод в промышленное производство, необходимы дополнительные системные экспериментальные исследования. В работе будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса ТАО на производительность обработки.

Методика экспериментальных исследований. Для исследований в лаборатории НИЛ “ОСА” Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля был изготовлен экспериментальный стенд ТУ9 (рис. 1).

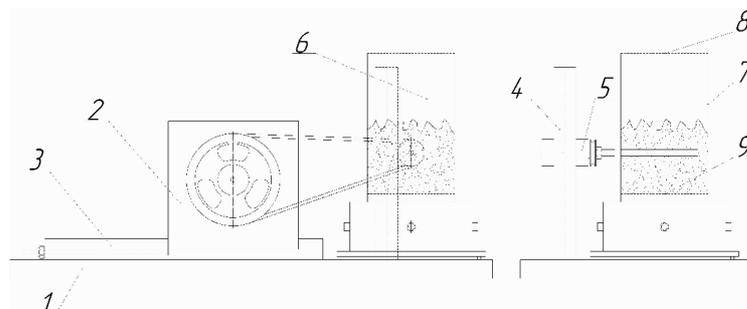


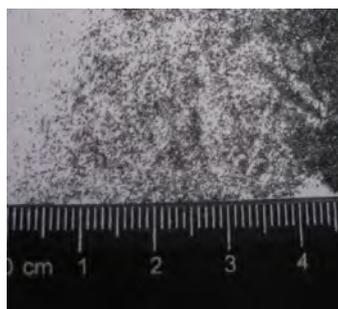
Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

- 1 – плита; 2 – электромеханический привод; 3 – натяжное устройство; 4 – направляющая, позволяющая перемещать шпindel в вертикальном направлении; 5 – шпindel обрабатываемой детали;
6 – установка для получения псевдооживленного слоя; 7 – рабочая камера установки;
8 – фильтр; 9 – газораспределительные решетки

Обработка на установке осуществляется так: обрабатываемая деталь устанавливается на шпиндель, который приводится в движение от электропривода. Под слой абразива, в который частично погружена обрабатываемая деталь, через газораспределительную решетку подается воздух от компрессорной станции. Давление воздуха от компрессора контролируют манометры. В качестве объектов исследований использовались полые стальные цилиндры (рис. 2). Для проведения исследований в качестве рабочей среды применялся карбид кремния черный различной зернистости (рис. 3) ОАО «Запорожский абразивный комбинат», изготовленный в соответствии с ТУ У 24.1-00222226-059:2006.



Рис. 2. Исследуемые образцы



а



б

Рис. 3. Рабочие среды: а – 53С16; б – 53С80

Оценивалось влияние на производительность процесса ТАО таких параметров, как: продолжительность обработки; окружная скорость вращения детали; характеристики газораспределительных решеток; высота загрузки абразивного зерна в рабочей камере; величина давления воздуха, подаваемого в установку для оживления абразива.

Для экспериментальных исследований контролируемым параметром, характеризующим производительность процесса обработки, выбран съем металла с поверхностей обрабатываемых образцов.

Влияние продолжительности обработки на производительность ТАО. Цель исследования – экспериментально оценить влияние продолжительности обработки на ее производительность.

Результаты экспериментальных исследований приведены на графике (рис. 4).

Исследования показали, что съем металла характеризуется высокой интенсивностью в начальный период обработки. По мере увеличения времени обработки съем металла постепенно уменьшается, и его величина становится стабильной. Снижение интенсивности съема металла с увеличением времени обработки обусловлено удалением грубых неровностей исходной поверхности в первые минуты обработки, что характеризует практически все методы обработки в свободных абразивах. В дальнейший съем металла определяется только режущей способностью абразивных частиц и физико-механическими свойствами материала детали, что совпадает с мнениями авторов работы [9, 10, 13].

Рассматривая аналогичные зависимости, например, для шпиндельной обработки в среде свободного абразива и виброабразивной обработки (рис. 5, 6), можно сделать вывод, о том, что в случае турбоабразивной обработки изменение съема происходит интенсивнее, вследствие чего машинное время обработки значительно сокращается, уменьшаясь от нескольких часов до нескольких минут.

Однако отметим, что при виброабразивной обработке обрабатывают группы деталей, поэтому в дальнейшем следует производить сравнение турбоабразивной обработки со шпиндельной, где одновременно осуществляется обработка лишь нескольких деталей, а в ряде случаев она единичная. В связи с этим для получения более полного представления о преимуществах этих методов

необходимо сравнить параметры поверхностного слоя (микрорельефа), получаемые после турбоабразивной и шпиндельной обработки в свободных абразивах.

Влияние окружной скорости вращения детали на производительность ТАО. Цель исследования – экспериментально оценить влияние окружной скорости вращения детали на съем металла.

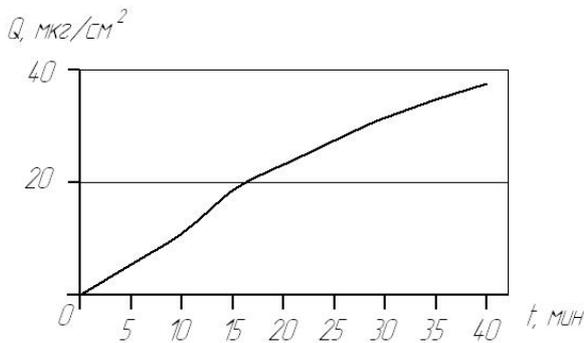


Рис. 4. Зависимость удельного съема металла с единицы поверхностей стальных образцов от времени при ТАО

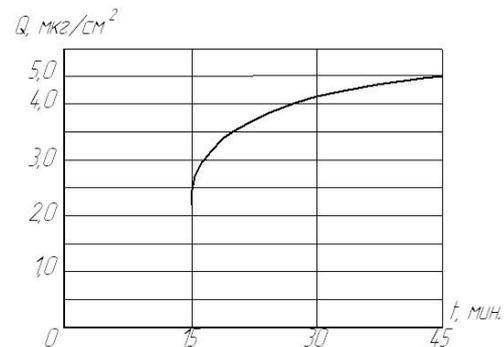


Рис. 5. Зависимость удельного съема металла с единицы поверхностей образцов от времени при шпиндельной обработке в свободных абразивах [14]

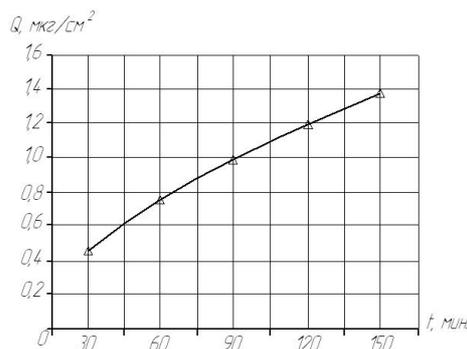


Рис. 6. Зависимости удельного съема металла с единицы поверхностей латунных образцов различной массы от времени при виброабразивной обработке [15]

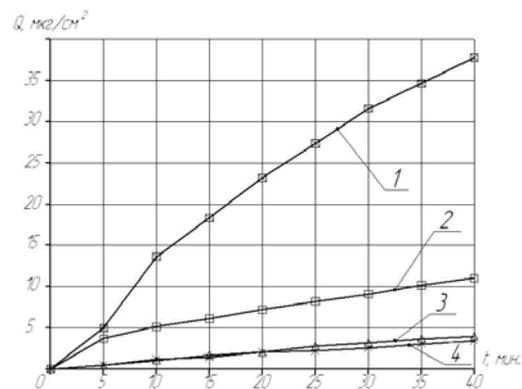


Рис. 7. Влияние окружной скорости вращения детали ($v_{окр}$) на производительность ТАО: 1 – $v_{окр}=22$ м/с; 2 – $v_{окр}=16$ м/с; 3 – $v_{окр}=10$ м/с; 4 – $v_{окр}=7$ м/с

Анализ влияния окружной скорости вращения детали на интенсивность съема металла (рис. 7) показывает, что повышение скорости вращения детали является эффективным способом увеличения интенсивности съема металла. Понятно, что с увеличением окружной скорости вращения детали съем возрастает за счет увеличения силового воздействия абразивных частиц на единицу площади обрабатываемой поверхности.

Влияния газораспределительных решеток на производительность ТАО. Известно, что зависимость съема металла от скорости воздуха для слоев различной зернистости имеет экстремальный характер [13]. Существование максимума на кривой $q=f(V_v)$ (где q – съем металла, V_v – скорость воздуха, оживающего абразив) объясняется одновременным и противоположным действием на процесс обработки двух основных факторов: повышение интенсивности движения частиц вблизи поверхности обработки и увеличение порозности системы по мере роста скорости воздуха, оживающего абразив [13, 16]. Первый фактор интенсифицирует процесс обработки, в то

же время второй вызывает уменьшение концентрации частиц и тем самым уменьшает число контактов с поверхностью обрабатываемой детали.

В свою очередь, характер распределения воздуха, оживающего абразив, во многом обеспечивается конструкцией газораспределительного устройства. Оживающий воздух входит в слой абразива одной или несколькими струями, и в общем случае решетку можно рассматривать как генератор турбулентных струй [16]. Истекающие струи формируют псевдооживленное состояние слоя. В зависимости от режима истечения, дальности струи и степени их стесненности в прирешеточной зоне создаются различные условия взаимодействия абразивного зерна и погруженного в такой слой тела [17]. А следовательно, различными будут и показатели производительности ТАО, для которой можно использовать различные газораспределительные решетки.

Анализ работ [17–19] показал, что в качестве основных параметров, характеризующих работу газораспределительных решеток и их влияние на качество псевдооживления частиц, используют гидравлическое сопротивление решетки (по отношению к сопротивлению слоя) – $\Delta P_{\text{реш}} / \Delta P_{\text{сл}}$, коэффициент газораспределения $K_r = \Delta P_{\text{реш}} / (\Delta P_{\text{реш}} + \Delta P_{\text{сл}})$ и живое сечение газораспределительного устройства ϕ , %. При этом оценка решеток по живому сечению весьма удобна для ориентировочных оценок [18]. Поэтому для исследований был выбран метод оценки влияния газораспределительных решеток на производительность ТАО по их живому сечению.

Цель – оценка влияния живого сечения газораспределительных решеток на процесс псевдооживления абразивной среды и производительность ТАО.

Для исследований в качестве газораспределительных решеток использовались металлотканые сетки, представляющие собой крестовое переплетение проволок одного диаметра, образующих квадрат правильной формы, но имеющих различное живое сечение. Для экспериментальных исследований отобраны решетки с большим, нормальным и низким живыми сечениями, где под большим понимают газораспределительные решетки с живым сечением в диапазоне 50–75 %, нормальным 25–50 % и низким до 25 %.

Давление воздуха, высота загружаемого слоя абразива оставались неизменными. Визуальные наблюдения, осуществляемые методом широкоформатной фотосъемки и скоростной киносъемки процесса в обычном свете показали, что применение газораспределительных решеток с различным сопротивлением (т.е. различным живым сечением) оказывает влияние на скорость и характер истечения оживающего агента из отверстий решетки и, следовательно, на структуру образующегося псевдооживленного слоя. Результаты влияния живого сечения газораспределительных решеток по производительности ТАО представлены графически на рис. 8.

Исследования подтвердили, что интенсивность обработки деталей турбоабразивным методом зависит от живого сечения газораспределительного устройства. Наибольший съем металла достигается при использовании решеток с большим живым сечением (52 %). Таким образом, при одинаковых энергетических затратах на осуществление обработки решетки с более высоким живым сечением, а соответственно и с низким гидродинамическим сопротивлением обеспечивают более высокую производительность ТАО.

Влияния высоты загрузки на производительность обработки. Цель – определить влияние высоты загрузки на производительность обработки.

Результаты экспериментальных исследований представлены графически (рис. 9).

Исследования показали, что высота загрузки имеет существенное влияние на производительность обработки. Излишнее снижение концентрации частиц вблизи поверхности обрабатываемой детали ведет к снижению обработки. Перенасыщение абразива так же негативно сказывается на производительности процесса и повышает его себестоимость.

Влияния давления воздуха на производительность обработки. Цель – определение влияния величины давления воздуха, подаваемого в установку, на производительность обработки.

Исследования показали (рис. 10, 11), что давление воздуха, подаваемого в установку для ожигения абразива, оказывает влияние на производительность ТАО. Для каждого размера зерна имеется оптимальное значение давления воздуха, которое соответствует максимальной производительности процесса. С увеличением зернистости абразива значение оптимального давления возрастает. Также отметим, что значимость влияния давления на производительность обработки изменяется в зависимости от окружной скорости вращения детали (рис. 10), что, возможно, связано с тем, что воздушная прослойка, которая создается вокруг детали, вращающейся с большой окружной скоростью, препятствует доступу абразивного зерна к обрабатываемой поверхности. Таким образом, установления диапазона оптимальных значений давления, а соответственно и скорости воздуха, ожигающего абразив, которые обеспечивали бы максимальную производительность обработки зерном различной зернистости, недостаточно для получения полных рекомендаций по осуществлению ТАО.

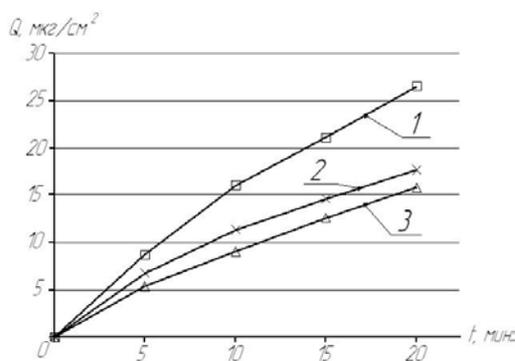


Рис. 8. Влияние величины живого сечения (ϕ) газораспределительных решеток, через которые подается воздух в рабочую камеру, на производительность обработки: 1 – $\phi = 52\%$; 2 – $\phi = 36\%$; 3 – $\phi = 17\%$

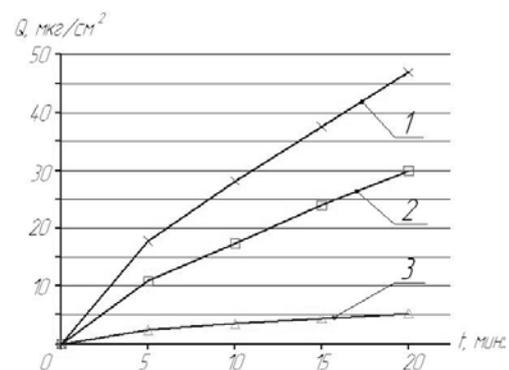


Рис. 9. Влияние высоты загрузки абразива на производительность ТАО

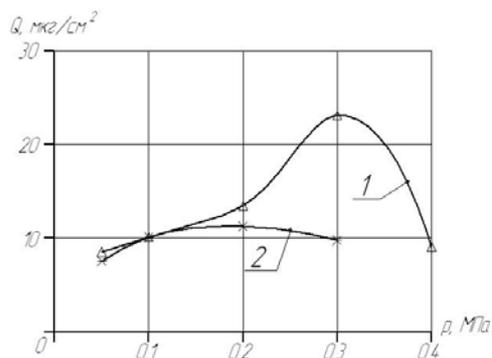


Рис. 10. Влияние величины давления воздуха p на производительность обработки при обработке абразивным зерном 53С63 (1) и 53С40 (2)

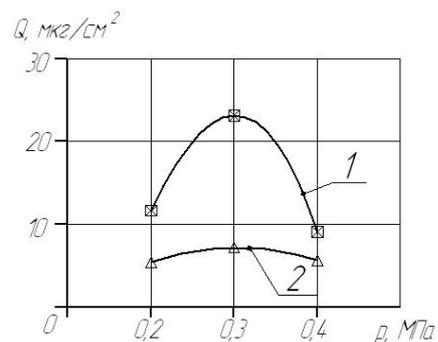


Рис. 11. Влияние величины давления воздуха p на производительность обработки при обработке деталей с окружной скоростью 22 м/с (1) и 16 м/с (2)

Вывод. Учитывая, что на ТАО влияет значительное количество факторов, целесообразно использовать методику многофакторного планирования и анализа эксперимента, что позволит количественно оценить влияние как отдельного фактора, так и взаимодействия факторов на производительность ТАО, а также сократить объем экспериментальных работ и повысить

достоверность результатов исследований на основе математического аппарата регрессионного анализа и статистических методов оценки адекватности полученных моделей. Результаты этого исследования будут изложены в следующей статье.

1. Карташов И. Н. *Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих контейнерах* / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с.
2. Кулаков Ю. М. *Отделочно-зачистная обработка деталей* / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Калмыков М. А. *Повышение эффективности процесса вибрационной обработки крупногабаритных изделий: дис... канд. тех. наук: 05.03.01* / Калмыков Михаил Александрович. – Луганск, 2005. – 223 с.
4. Мосталыгин Г. П. *Технология машиностроения* / Мосталыгин Г.П., Толмачевский Н.Н. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. Бранспиз Е.В. *Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01* / Бранспиз Елена Владимировна. – Луганск, 2001. – 265 с.
6. *Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т.* / [Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. 3: *Технология изготовления деталей машин* / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; под общ. ред. А.Г. Суслова. 2002. – 840 с.
7. *Технологія виробництва авіаційних двигунів: Ч. 3. Методи обробки деталей авіаційних двигунів* / [Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Яценко В.К. та ін.]. – Запоріжжя: ВАТ “Мотор Січ”, 2008. – 639 с.
8. Massarsky M. *Turbo-abrasive machining and finishing* / Michael Massarsky, David A. Davidson. – *Metal Finishing, Volume 95, Issue 7, July 1997, Page 29*.
9. Кремень З.И. *Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля: метод. рекомендации* // Кремень З.И., Массарский М.Л., Гузель В.З. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 53 с.
10. Массарский М.Л. *Повышение эффективности отделочной абразивной обработки деталей сложного профиля на основе разработки и внедрения нового технологического способа – турбоабразивной обработки: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08* / Массарский Моисей Липович – Саратов, 1989. – 27 с.
11. Попенко А.И. *Повышение эффективности турбоабразивной обработки цилиндрических деталей* / А.И. Попенко, А.Я. Качан // *Технологические системы.* – 2003. – № 3. – С. 11 – 18.
12. Мозговой В.Ф. *Технология и оборудование для финишно-упрочняющей обработки деталей ГТД свободным абразивом* / В.Ф. Мозговой, А.И. Попенко, А.Я. Качан // *Технологические системы.* – 2001. – № 3. – С. 25 – 29.
13. Попенко А.И. *Оптимизация процесса финишной полировально-упрочняющей обработки наружных поверхностей тонкостенных валов роторов ГТД* / А.И. Попенко, В.Ф. Мозговой, А.Я. Качан // *Технологические системы.* – 2002. – № 1. – С. 57 – 64.
14. Нечай Е.В. *Анализ финишных методов обработки деталей в среде свободных абразивов* / Е.В. Нечай, Н.И. Пичугин // *Вибрации в технике и технологиях.* – 2010. – № 2 (58). – С. 152–166.
15. Лубенская Л.М. *О влиянии массы гранул на производительность процесса вибрационной обработки* / Л.М. Лубенская, Т.А. Шумакова, Н.И. Пичугин // *Вибрации в технике и технологиях.* – 2010. – № 3 (59). – С. 62–79.
16. Гельперин Н.И. *Основы техники псевдооживления* / Н.И. Гельперин, В.Г. Айништейн, В.Б. Кваша; ред. Н. И. Гельперин. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
17. Королев В.Н. *Структура псевдооживленного слоя вблизи погруженной в него поверхности* / В.Н. Королев, Н.И. Сыромятников // *Журн. прикладной химии.* – 1973. – Т. 46, № 9. – С. 1956–1960.
18. Забродский С.С. *Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем (общие вопросы, разработки и закономерности)* / С.С. Забродский. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.
19. Забродский С.С. *Перенос тепла псевдооживленным слоем зернистого материала* / С.С. Забродский. – Труды Института энергетики АН БССР, 1958. – Вып. 8.