

УДК 531.32.816(075.8):621.923

DOI: 10.30987/article\_5c652633282411.11499278

В.И. Бутенко, И.В. Давыдова, Т.В. Атоян

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЁСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РОБОТА НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Выполнен анализ динамического состояния механической системы разработанной конструкции технологического робота для алмазного выглаживания поверхностей деталей машин. Определена амплитудно-фазовая частотная характеристика для устойчивого процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей. Проведены сравнительные экспериментальные исследования процесса алмаз-

ного выглаживания с установкой инструмента на токарно-винторезном станке и с использованием разработанного одностоечного технологического робота.

**Ключевые слова:** качество, поверхностный слой, деталь, динамическая жёсткость, робот, алмазное выглаживание, механическая система.

V.I. Butenko, I.V. Davydova, T.V. Atoyan

## DYNAMIC STIFFNESS IMPACT OF PROCESSING ROBOT UPON PARTS WORKED SURFACE QUALITY

The aim of the work is the improvement of qualitative indices of a surface layer in parts machined with diamond smoothing with the use of a processing robot. An industrial robot design is developed allowing the fulfillment of technological finishing operations of machinery surfaces and the dynamic stiffness investigation of a technological robot for diamond smoothing formed and curvilinear surfaces of parts is carried out. It is shown that in case of the dynamic system situation of an industrial robot on the stability border there is a possibility to estimate such basic technological indices of a part surface diamond smoothing as an effort of smoothing, radius of a diamond indenter, the speed of rotation of parts worked, values of a longitudinal feed, temperature in the area of a tool contact with the part worked surface and so on.

The experimental investigations carried out of the quality of parts surface worked with the use of an industrial robot for diamond smoothing allowed obtaining an empiric formula for the prediction of quality operation indices depending on stiffness of the technological system used, machining modes and an initial value of the index to be defined. It is shown that having a dynamic stiffness high enough, an industrial robot for machinery surface diamond smoothing may be embedded in an automated line for manufacturing parts with profiled and curvilinear surfaces.

**Key words:** quality, surface layer, part, dynamic stiffness, robot, diamond smoothing, mechanical system.

### Введение

В современном машиностроении существуют две проблемы, сдерживающие прогресс в создании конкурентоспособных изделий:

– технологическое обеспечение эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя деталей [1];

– разработка, создание и эффективное использование мобильных промышленных роботов для металлорежущих станков и автоматических линий с возможностью выполнения ими технологических операций [2].

Одним из реальных и эффективных путей решения первой проблемы является применение в качестве финишной опера-

ции технологического процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей машин [3]. Однако алмазное выглаживание поверхностей деталей традиционными методами на металлорежущих станках имеет ряд недостатков, среди которых особенно существенным является большой разброс показателей качества материала поверхностного слоя обрабатываемой детали из-за невысокой жёсткости конструктивной цепи, связывающей главное движение с движением подачи станка, а также невозможности использования алмазного выглаживания фасонных и криволинейных поверхностей деталей.

### Определение динамической жёсткости технологического робота

Для повышения эффективности процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей машин разработана компоновочная схема технологического робота (рис. 1а), в котором установлен пневмогидромеханический привод, а для перемещения руки с выглаживателем вдоль оси обрабатываемой детали использована пара «винт - гайка». При этом постоянная сила выглаживания создается гидроцилиндром (на схеме не показан) и может регулироваться в достаточно широком диапазоне,

что даёт возможность обрабатывать цилиндрические, фасонные и криволинейные поверхности деталей на различных режимах. На основе разработанной компоновочной схемы был изготовлен и испытан технологический робот для алмазного выглаживания деталей, встроенный в автоматическую линию механической обработки шпинделей гидрокопировальных станков, выпускаемых ОАО «Ейский станкостроительный завод» (рис. 1б).

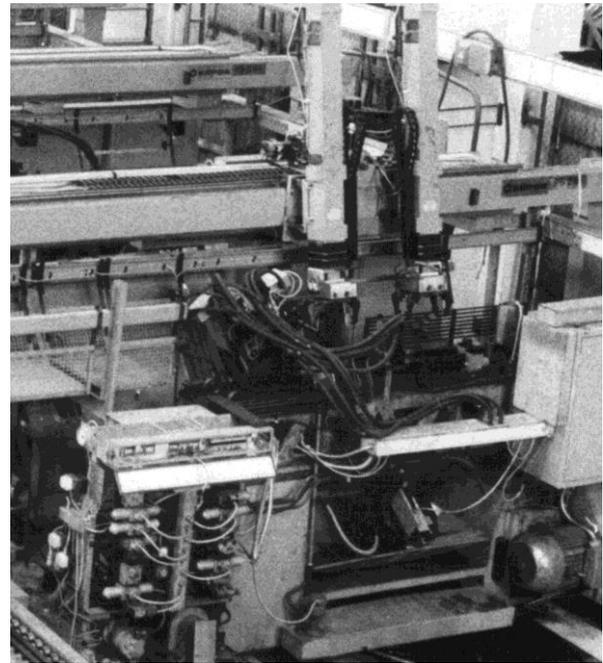
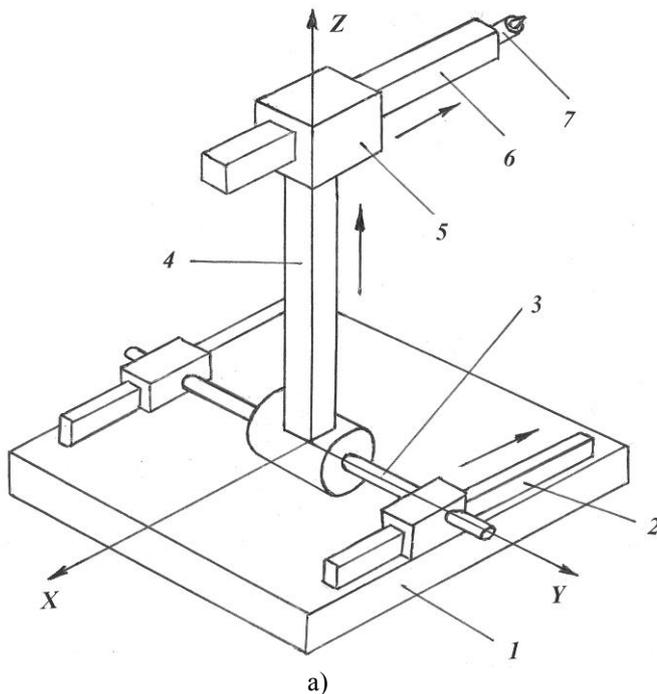


Рис. 1. Компоновочная схема (а) и общий вид (б) технологического робота для алмазного выглаживания цилиндрических и фасонных поверхностей деталей: 1 – основание; 2 – горизонтальные направляющие; 3 – пара «винт - гайка»; 4 – стойка; 5 – модуль подъёма; 6 – рука; 7 – инструмент

В общем случае жёсткость технологической системы механической обработки детали  $j$  можно рассматривать как сумму её статической жёсткости  $j_{ст}$  и динамической характеристики  $W_{\delta}$ :

$$j = j_{ст} + W_{\delta}.$$

Статическая жёсткость  $j_{ст}$  обычно принимается постоянной, так как она, являясь характеристикой оборудования, входящего в технологическую систему, обусловлена конструкцией этого оборудования. Динамическая характеристика системы  $W_{\delta}$  является переменной величиной и зависит от многих факторов, непосред-

ственно связанных с процессом обработки (режимы, материал и размеры обрабатываемой детали, состояние используемого инструмента и т.д.). Поэтому от её текущего значения во многом зависит устойчивость процесса обработки детали и качество получаемого на финишных операциях поверхностного слоя.

Как известно [4], при анализе механической системы с точки зрения её устойчивости возникает необходимость решения нелинейной задачи определения амплитуд и частот автоколебаний с последующей оценкой их допустимого уровня.

В связи с этим анализ динамического состояния механической системы (в том числе разработанной конструкции промышленного робота, выполняющего технологические операции) в первом приближении обычно выполняется по характеристике разомкнутой одноконтурной системы, которая строится как произведение характеристик образующих её элементов. При этом для каждого значения частоты амплитуды перемножаются, а фазы складываются, вследствие чего характеристика получается безразмерной.

На рис. 2 показана схема эквивалентной динамической системы (рис. 2а), отображающая состояние промышленного робота, и её амплитудно-фазовая частотная характеристика  $W^t$  для устойчивого про-

цесса алмазного выглаживания (рис. 2б), построенная для случая обработки поверхности детали после чистового точения и условия, что в системе имеет место размыкание по обратной связи с запаздыванием. В этом случае характеристика  $W^t$  определяется по следующей формуле:

$$W^t = W_u e^{-t\Delta R},$$

где  $W_u$  – характеристика системы без выделенного элемента с запаздыванием;  $e$  – основание натуральных логарифмов;  $t$  – заданное время запаздывания;  $\Delta R$  – допустимое колебание параметра шероховатости предварительно обработанной поверхности детали.

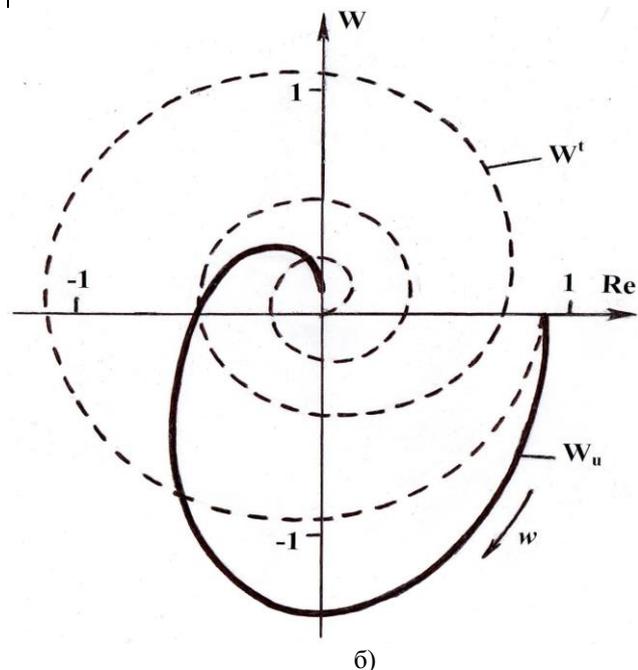
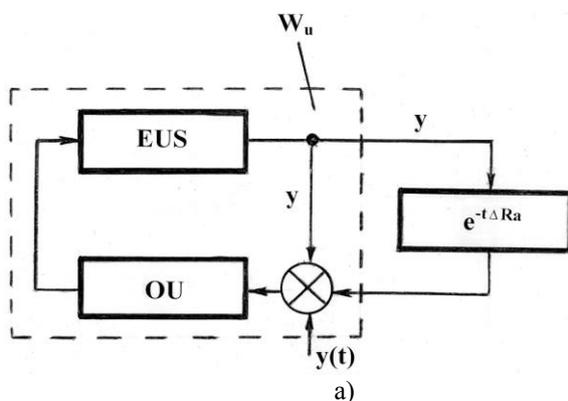


Рис. 2. Эквивалентная динамическая система (а) и амплитудно-фазовая частотная характеристика  $W^t$  (б) для устойчивого процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей промышленным роботом

Для промышленного робота, выполняющего технологическую операцию – алмазное выглаживание поверхности детали, характеристика системы  $W_u$  представляет собой характеристику незамкнутой динамической системы, определяемую внешним воздействием алмазного инструмента (выглаживателя) на обрабатываемую поверхность и вычисляемую по формуле

$$W_u = \frac{y}{y(t)} = \frac{W_\delta}{1 + W_\delta},$$

где  $y$ ,  $y(t)$  – входные и выходные внешние воздействия в замкнутой системе (рис. 2а);  $W_\delta$  – динамическая характеристика промышленного робота, определяемая его конструкцией.

Если принять допущение о том, что конструкция промышленного робота для выполнения технологических операций может быть представлена как разомкнутая

система третьего типа, то динамическая характеристика  $W_\delta$  определится по формуле [4]

$$W_\delta = W_{EUS} W_{OU},$$

где  $W_{EUS}$  – динамическая характеристика эквивалентной упругой системы, соответствующей разработанной компоновке промышленного робота (рис. 1а);  $W_{OU}$  – динамическая характеристика технологической системы «рука промышленного робота – алмазный выглаживатель – деталь – шпиндель станка».

Известно, что динамическая система считается устойчивой, если её отклонение от заданного состояния в переходном процессе, вызванном, например, ограниченным по величине воздействием  $y(t)$ , со временем уменьшается [5; 6]. С учетом этого из анализа амплитудно-фазовой частотной характеристики промышленного робота, выполняющего алмазное выглаживание поверхности детали (рис. 2б), следует, что динамическая система будет нахо-

диться в равновесии в том случае, когда характеристика  $W'$  отсекает на отрицательной вещественной оси отрезок  $Re < |1|$ . В том случае, когда  $Re = 1$ , динамическая система промышленного робота находится на границе устойчивости и по этому отрезку можно оценить основные технологические показатели процесса алмазного выглаживания поверхности детали: усилие выглаживания, радиус алмазного индентора, скорость вращения обрабатываемой детали, величину продольной подачи, температуру в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью детали и т.д. Это даёт возможность оперативно управлять работой промышленного робота, выполняющего технологические операции, так как указанные характеристики тесно связаны с автоколебательными процессами рассматриваемой динамической системы, получая при этом высокие показатели качества поверхностного слоя детали.

### Экспериментальные исследования качества обработанной поверхности детали

Проведены сравнительные экспериментальные исследования процесса алмазного выглаживания с установкой инструмента на токарно-винторезном станке мод. 1А620 и с использованием разработанного одностоечного технологического робота (рис. 2а). Обработке подвергались цилиндрические валики из стали 30ХГСА диаметром 24 мм и длиной 320 мм, прошедшие предварительное чистовое точение и имеющие следующие начальные показатели качества поверхностного слоя: шероховатость  $Ra = 0,63 - 0,80$  мкм; волнистость  $W_z = 10 - 16$  мкм; макроотклонения  $H_{max} = 80 - 100$  мкм; шаг микронеровностей  $S_m = 1,25 - 1,60$  мкм; микротвёрдость  $H_V = 120 - 150$  ГПа; технологические остаточные напряжения  $\sigma_{ост} = +250 - 300$  МПа; толщина слоя с изменёнными физико-механическими свойствами  $\Delta h = 0,2 - 0,25$  мм. Алмазное выглаживание поверхностей исследуемых образцов осуществлялось на следующих режимах: сила выглаживания  $P_g = 300$  Н, скорость вращения образцов  $V = 0,63$  м/с, подача выглаживателя  $S_g = 0,02$  мм/об, число проходов – 1 при непрерыв-

ной подаче в зону обработки минерального масла И-50. В случае использования разработанного технологического ПР алмазный выглаживатель со стандартной вставкой в виде полусферического индентора с рабочей частью из синтетического алмаза АСПМ-3 радиусом  $r = 2$  мм был установлен и закреплён специальным зажимом на руке робота.

После алмазного выглаживания определялись все перечисленные показатели качества поверхностного слоя детали:  $Ra$ ,  $W_z$ ,  $H_{max}$ ,  $S_m$ ,  $H_V$ ,  $\sigma_{ост}$ ,  $\Delta h$ . В табл. 1 приведены значения этих показателей как средние арифметические по результатам десяти последовательно выполненных измерений, анализ которых свидетельствует о высокой эффективности использования разработанного технологического ПР для улучшения показателей качества поверхностного слоя деталей, подвергнутых алмазному выглаживанию. Это, в свою очередь, способствует существенному повышению эксплуатационных показателей деталей машин.

Таблица 1

Показатели качества поверхностного слоя деталей, подвергнутых алмазному выглаживанию

Способ обработки	$W_{\Sigma}$ , мкм	$H_{max}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$S_m$ , мкм	$\sigma_{ост}$ , МПа	$H_V$ , ГПа	$\Delta h$ , мм
На токарном станке	12,5	68	0,35	0,84	175	143	0,37
С использованием ПР	4,2	25	0,30	0,56	190	151	0,39

Выполнено экспериментальное исследование влияния усилия обкатки  $P_в$  на общую жёсткость технологической системы  $j$  при алмазном выглаживании образцов из стали 30ХГСА диаметром 24 мм и длиной 320 мм (рис. 3), из которого следует, что жёсткость системы с установленным одноступенчатым технологическим роботом в 1,5-1,8 раза выше жёсткости системы при использовании токарного станка мод.

1А620. Было установлено (рис. 4), что повышение жёсткости технологической системы при алмазном выглаживании с использованием технологического робота позволяет уменьшить разброс микротвёрдости материала поверхностного слоя деталей  $H_V$ , обеспечив существенное снижение интенсивности изнашивания деталей трибосистем.

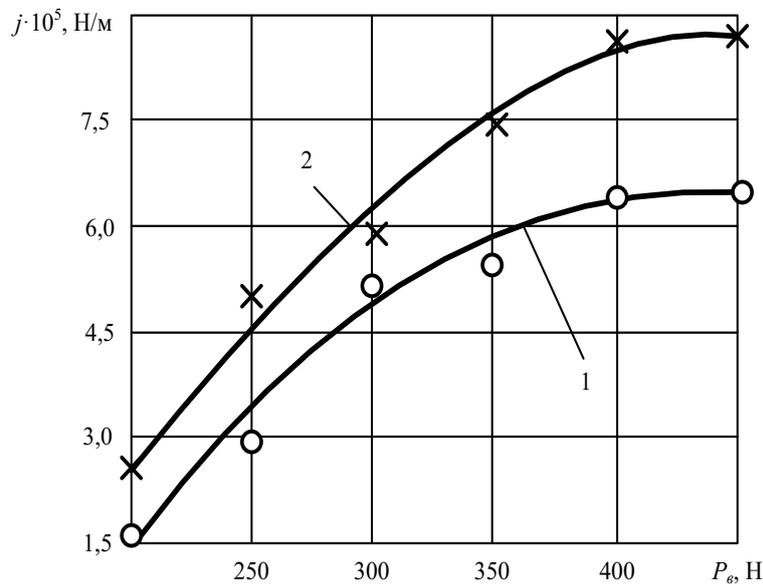


Рис. 3. Графики зависимости жёсткости технологической системы  $j$  от усилия алмазного выглаживания  $P_в$  поверхностей деталей на токарном станке (кривая 1) и с использованием технологического робота (кривая 2)

С использованием метода планирования эксперимента типа  $2^k$  была получена следующая эмпирическая формула для прогнозирования эксплуатационных показателей качества  $K$  ( $Ra$ ,  $\sigma_{ост}$ ,  $H_V$ ) при алмазном выглаживании поверхностей деталей из низкоуглеродистых сталей с пределом текучести  $\sigma_m = 200-300$  МПа в зависимости от жёсткости используемой технологической системы  $j$ , режимов обработки  $P_в$ ,  $V$ ,  $S_в$  и начального значения определяе-

мого показателя  $K_{нач}$  ( $(Ra)_{нач}$ ,  $(\sigma_{ост})_{нач}$ ,  $(H_V)_{нач}$ ):

$$K = C_k j^a P_в^b V^c S_в^d K_{нач}^f, \quad (1)$$

где  $C_k$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  – коэффициент и показатели степеней, значения которых приведены в табл. 2.

Полученная эмпирическая формула (1) может быть применена для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя деталей, подвергаемых алмазному выглаживанию с использованием технологического робота.

### Заключение

Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение в процессах алмазного выглаживания поверхностей деталей

машин технологических роботов вместо традиционного выполнения подобных операций на металлорежущих станках позволяет существенно повысить жёсткость технологической системы.

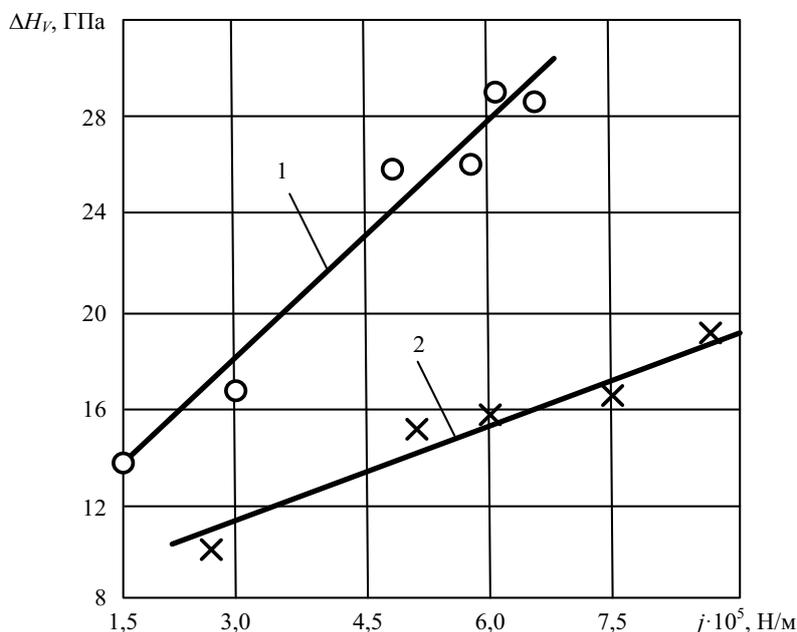


Рис. 4. Графики зависимости разброса микротвёрдости материала поверхности детали  $H_V$  от жёсткости технологической системы  $j$  при обработке детали на токарном станке (прямая 1) и с использованием технологического робота (прямая 2)

Таблица 2

Значения коэффициента  $C_k$  и показателей степеней  $a, b, c, d, f$  для определения показателей качества при алмазном выглаживании поверхностей деталей из сталей с пределом текучести  $\sigma_m = 200-300$  МПа

Показатель качества, $K$	Размерность	$C_k$	$a$	$b$	$c$	$d$	$f$	Условия и ограничения
$Ra$	мкм	0,028	0,185	0,307	0,912	0,456	0,371	$(Ra)_{нач} = 1,25-3,2$ мкм
$\sigma_{ост}$	МПа	0,452	0,295	0,504	0,487	0,309	0,196	Растягивающие напряжения $(\sigma_{ост})_{нач} = 150-400$ МПа
$H_V$	ГПа	0,436	0,310	0,491	0,539	0,512	0,235	Измерительное средство – МЕТ-У1

2. Использование технологических роботов при алмазном выглаживании поверхностей деталей обеспечивает получение на них высоких эксплуатационных показателей по параметрам шероховатости, микротвёрдости и состояния материала.

3. Обладая значительно более высокой жёсткостью, технологические системы

с промышленными роботами являются незамкнутыми, что позволяет управлять процессами обработки на финишных операциях с целью получения требуемых эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности детали / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – 426 с.</li> <li>2. Бутенко, В.И. Стратегический инновационный менеджмент в станкостроении / В.И. Бутенко, Ю.П. Анкудимов, Ю.Г. Чернега. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. – 264 с.</li> <li>3. Бутенко, В.И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В.И. Бутенко. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. – 219 с.</li> </ol>                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1987. – 360 с.</li> <li>5. Заковоротный, В.Л. Нелинейная триботехника / В.Л. Заковоротный. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2000. – 293 с.</li> <li>6. Заковоротный, В.Л. Аттракторы механических систем, взаимодействующих со средой / В.Л. Заковоротный // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5. – С. 132 – 152.</li> </ol>  |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suslov, A.G. <i>Parts Surface Engineering</i> / A.G. Suslov, V.F. Beziyazychny, Yu.V. Panfilov [et al.]. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 426.</li> <li>2. Butenko, V.I. <i>Strategic Innovation Management in Machine Tool Industry</i> / V.I. Butenko, Yu.P. Ankudimov, Yu.G. Chernega. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2015. – pp. 264.</li> <li>3. Butenko, V.I. <i>Parts Surface Finishing: Methods, Devices, Tools</i> / V.I. Butenko. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2016. – pp. 219.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Kudinov, V.A. <i>Machine Dynamics</i> / V.A. Kudinov. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 360.</li> <li>5. Zakovorotny, V.L. <i>Non-Linear Tribotechnics</i> / V.L. Zakovorotny. – Rostov-upon-Don: DSTU, 2000. – pp. 293.</li> <li>6. Zakovorotny, V.L. <i>Attractor of Engineering Systems Interacting with Environment</i> / V.L. Zakovorotny // Proceedings of TRTU. – 2001. – No.5. – pp. 132-152.</li> </ol> |

Статья поступила в редакцию 8.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Липецкого государственного  
технического университета

Козлов А.М.

Статья принята к публикации 25.01.19.

## Сведения об авторах:

**Бутенко Виктор Иванович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, г. Ростова на Дону, тел. 8-928-600-57-61. e-mail: [vibrotech@mail.ru](mailto:vibrotech@mail.ru).

**Давыдова Ирина Вазгеновна**, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, г.

**Butenko Victor Ivanovich**, Dr, Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Don State Technical University, e-mail: [vibrotech@mail.ru](mailto:vibrotech@mail.ru).

**Davydova Irina Vazgenovna**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Don

Ростова на Дону, тел. 8-918-513-73-60. e-mail: [davidov.olina2012@yandex.ru](mailto:davidov.olina2012@yandex.ru).

**Атоян Татьяна Вазгеновна**, к.т.н., доцент кафедры «Управление качеством» Донского государственного технического университета, г. Ростова на Дону, тел. 8-918-523-84-64. e-mail: [atoyn.t@yandex.ru](mailto:atoyn.t@yandex.ru).

State Technical University, e-mail: [davidov.olina2012@yandex.ru](mailto:davidov.olina2012@yandex.ru).

**Atoyan Tatiana Vazgenovna**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Quality Control", Don State technical University, e-mail: [atoyn.t@yandex.ru](mailto:atoyn.t@yandex.ru).