

УДК 621.9.02.6

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53

Повышение эффективности обработки длинномерных валов

Яцун Е. И.¹ ✉, Анисеева Н. П.¹, Карнаухов И. С.¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Резюме

В статье приводятся условия обеспечения параметров качества механической обработки направляющей поверхности штока гидроцилиндра точением и методами поверхностного пластического деформирования.

Цель исследования: повышение стабильности и производительности процесса обработки нежестких деталей класса валов при обеспечении требуемых параметров качества.

Методы. Проведен анализ статических и динамических характеристик инструментальной системы для режущо-деформирующей обработки. Проведен анализ твердотельной модели резцов фирм Lamina и Mitsubishi с помощью программы Solidworks. Для проверки работоспособности резца фирмы Mitsubishi, стабильности получаемых размеров, шероховатости поверхностей и определения периода стойкости пластин ставился полнофакторный эксперимент 2³.

Результаты. По результатам анализа с помощью программы Solidworks выбран резец фирмы Mitsubishi и проведена опытная промышленная обработка. Промышленный эксперимент показал, что при скорости резания резцом фирмы Mitsubishi, рекомендуемой производителем 200...300 м/мин., возникают вибрации. Для устранения вибраций при точении резцом фирмы Mitsubishi скорость резания была экспериментально принята ≈ 40 м/мин. Из-за уменьшения скорости резания значительно снизилась производительность обработки.

Разработаны новые конструкции инструментов инструментальной системы для режущо-деформирующей обработки нежестких деталей класса «валы», повышающие производительность обработки при стабильности получения требуемых параметров качества: обкатная головка с демпфирующим элементом и демпфирующий резец.

Проведены лабораторные испытания обкатной головки – предварительно определено усилие накатывания, условия состояния поверхности перед накатыванием. Проведена виброакустическая диагностика работы демпфирующего резца в лабораторных условиях. Проведена экспериментальная проверка работы новых инструментов инструментальной системы и анализ достигнутых параметров качества.

Заключение. Применение новых инструментов инструментальной системы для комбинированной режущо-деформирующей обработки позволило повысить производительность и стабильность процесса и обеспечить заданные параметры – точность формы, размеров, шероховатость (JIT7...8, Ra < 0.16...0.32 мкм) и физико-механические свойства поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: нежесткая деталь; инструментальная система; шероховатость; вибрации; демпфирующий резец.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Яцун Е. И., Анисеева Н. П., Карнаухов И. С., 2019

Для цитирования: Яцун Е. И., Аникеева Н.П., Карнаухов И. С. Повышение эффективности обработки длинномерных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 1. С. 43-53. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53.

UDC 621.9.02.6

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53

Increase in Processing Efficiency of Long-Length Shafts

Elena I. Yatsun ¹ ✉, Nadezhda P. Anikeeva ¹, Ivan S. Karnaukhov ¹

¹ Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Conditions of ensuring quality parameters of directing mechanical operation of hydraulic cylinder rod surface by turning and by methods of superficial plastic deformation are described in the paper.

Purpose of reseach is to increase in stability and productivity of nonrigid details processing when ensuring required quality parameters.

Methods. Analysis of static and dynamic characteristics of a tool system for cutting-deforming processing was done. Analysis of Lamina and Mitsubishi solid-state cutters was done by Solidworks program. 2³ experiment was done to check operability of Mitsubishi cutter, stability of obtained sizes, roughness of surfaces. It was also done to define the period of firmness of plates.

Results. Mitsubishi cutter was chose according to the results of the analysis made by Solidworks program and experimental industrial processing was carried out. Industrial experiment shows that there are vibrations made by Mitsubishi cutter at recommended cutting speed 200 ... 300 m/min. Experimental cutting speed was ≈ 40 m/min to eliminate vibrations made by Mitsubishi cutter. Processing productivity decreased considerably due to cutting speed reduction.

New tool design of a tool system for cutting-deforming processing of nonrigid details -"shafts" was developed. New tools increase processing productivity at obtaining stability of required quality parameters: rolling head with damping element and damping cutter.

Laboratory tets of a rolling head was done. Rolling effort, surface condition was defined before rolling. Vibroacoustic diagnostics of damping cutter operation in vitro was carried out. Experimental inspection of new tools operation of a tool system and analysis of quality parameters was carried out.

Conclusion. Use of new tools of a tool system for combined cutting-deforming processing allows to increase productivity and stability of the process and to ensure set parameters: accuracy of a form, sizes, roughness (JT7...8, Ra <0.16 ... 0.32 microns) and physicommechanical properties of detail's surface layer.

Key words: nonrigid detail; tool system; roughness; vibrations; damping cutter.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Yatsun E. I., Anikeeva N. P, Karnaukhov I. S. Increase in Processing Efficiency of Long-Length Shafts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2019; 23(1): 43-53 (in Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53.

Введение

Современные машины и оборудование должны обладать хорошими эксплуатационными характеристиками в различных условиях их применения. Улучшение эксплуатационных характеристик может быть достигнуто как за счет конструктивного совершенствования машин, применения новых конструкционных материалов, использования прогрессивной технологии изготовления деталей, так и за счет разработки новых конструкций инструментов и усовершенствования уже имеющихся.

Известные конструкции инструментов инструментальных систем для обработки длинномерных валов не обладают в достаточной мере свойствами, предъявляемыми к системам с равновесным силовым состоянием. Это обусловлено такими факторами, как высокие радиальные нагрузки; недостаточная жесткость элементов представленных инструментов инструментальных систем; колебание жесткости подсистемы «деталь - инструмент» по длине обработки и т.д. Эти недостатки не позволяют обеспечить силового замыкания в подсистеме «деталь-инструмент» и ведут к снижению точности обработки, возникновению поперечных колебаний, в результате чего качество снижается. Таким образом, известные конструкции инструментов и инструментальных систем для обработки нежестких валов не в полной мере являются эффективными.

Целью исследования является разработка новых высокоэффективных конструкций инструментов и инструмен-

тальных систем для изготовления нежестких деталей, обеспечивающих стабильность получения заданных параметров качества обработанных поверхностей и повышение производительности процесса.

Объектом исследования являются условия обеспечения требуемых параметров качества при обработке точением и методами поверхностного пластического деформирования направляющей поверхности штока гидроцилиндра.

В статье проведен анализ статических и динамических характеристик инструментальной системы для режущей деформирующей обработки, оказывающих влияние на параметры качества обработки; приведены результаты исследования технологических параметров обработки штока, полученных при производственных и лабораторных испытаниях.

Статические и динамические характеристики процесса точения нежестких валов

Решение задачи стабилизации процесса обработки при резании позволит обеспечить заданную стойкость режущего инструмента [1-7].

На динамическое поведение инструмента при обработке резанием нежестких деталей большое влияние оказывают возбуждаемые автоколебания инструмента [8]. Существуют следующие основные гипотезы причин возбуждения автоколебаний инструмента:

1. Нелинейность характеристик сил резания. При этом сила резания считается связанной с режимами обработки и

геометрией инструмента аналитическим соотношением следующего вида:

$$F = Kp \cdot S_o^{Ks} \cdot V^{Kv} \cdot b^{Kt}, \quad (1)$$

где S_o – подача; V – скорость резания; b – глубина резания; Kp , Kv , Ks , Kt – эмпирические коэффициенты.

Отметим, что статическая характеристика силы резания не применима для анализа процессов обработки материалов с вибрациями, так как коэффициенты в формуле (1) при вибрациях меняются с изменением режимов обработки.

2. Падающая зависимость коэффициента трения от относительной скорости между стружкой и инструментом, а также между деталью и инструментом.

3. Регенерация колебаний при движении по следу, образуемому на поверхности резания в процессе обработки.

В реальных технологических системах при обработке материалов возможно возбуждение автоколебаний по нескольким причинам одновременно. Значит необходимо учесть все причины, вызывающие вибрации инструмента.

Кроме статической характеристики силы резания (1) могут быть рассмотрены следующие динамические характеристики:

1. Линейная динамическая характеристика, представляющая собой зависимость силы резания от толщины срезаемого слоя [8]:

$$F(t) = Kp \cdot h(t), \quad (2)$$

где Kp – эмпирический коэффициент;

$h(t)$ – толщина срезаемого слоя в произвольный момент времени t .

2. Линейная динамическая характеристика с запаздыванием, когда сила ре-

зания в настоящий момент времени t пропорциональна толщине срезаемого слоя, измеренного в момент времени $t - Tp$:

$$F(t) = Kp \cdot h(t - Tp), \quad (3)$$

где Tp – время запаздывания.

3. Нелинейная динамическая характеристика, представляющая собой зависимость силы резания от толщины срезаемого слоя в следующем виде:

$$F(t) = Kp[h(t) + K_1 h^2(t) + K_2 h^2(t) + K_3 h^2(t)], \quad (4)$$

где K_i – эмпирические коэффициенты.

Определение эмпирических коэффициентов и получение решения нелинейной динамической характеристики вида (4) является очень трудоемкой задачей.

Вибрационная модель состояния режущей кромки инструмента при обработке нежестких валов

В работе [9] для построения вибрационной модели поведения режущей кромки инструмента при обработке труднообрабатываемых сплавов рассмотрена линейная динамическая характеристика (2).

Вибрационная модель с линейной системой уравнений основана на линейной динамической характеристике силы резания. При точении инструментом с большим вылетом наименее жестким элементом в технологической системе является державка. Поэтому при расчете колебаний системы можно ограничиться только рассмотрением вибраций державки. Для упрощения расчетов за основу принята схема свободного прямоугольного резания (рис. 1, а).

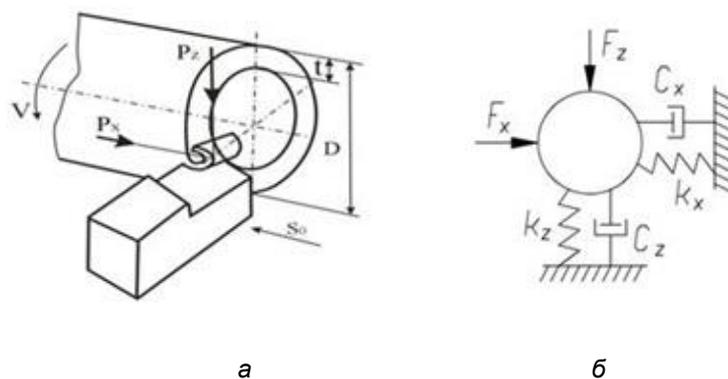


Рис. 1. Схема свободного прямоугольного резания: а - принципиальная схема процесса ортогонального резания; б - расчетная схема при свободном прямоугольном резании

Согласно схеме (рис. 1, б) режущий инструмент представляется в виде точечной массы с двумя степенями свободы, совершающей колебания в направлениях X и Z . В каждом направлении точечная масса подкреплена упругими и демпфирующими элементами. На массу действует также возмущающая сила, являющаяся результатом взаимодействия режущих кромок инструмента с материалом заготовки (сила резания). В условиях динамического равновесия державки, с учетом действующих на нее сил резания, получены следующие линейные уравнения колебаний режущей кромки инструмента:

$$\begin{cases} M_x \cdot \ddot{x} + c_x \cdot \dot{x} + k_x \cdot x = -F_x \\ M_z \cdot \ddot{z} + c_z \cdot \dot{z} + k_z \cdot z = -F_z, \end{cases} \quad (5)$$

где $M_x \cdot \ddot{x}, M_z \cdot \ddot{z}$, – силы инерции колебательной системы;

M_x, M_z – массы колебательной системы;

$$\begin{cases} F_x = K_x \cdot b \left[S_0 + x(t) - x \left(t - \left(T_0 + \frac{Z(t) - Z(t - T_0)}{\omega_0 \cdot R} \right) \right) \right] \\ F_z = K_z \cdot b \left[S_0 + x(t) - x \left(t - \left(T_0 + \frac{Z(t) - Z(t - T_0)}{\omega_0 \cdot R} \right) \right) \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений перемещений инструмента, вызванных вибрациями,

\dot{x}, \dot{z} – скорость перемещений колебательной системы;

c_x, c_z – коэффициенты трения в системе (коэффициент демпфирования);

k_x, k_z – коэффициенты жесткости колебательной системы;

F_x, F_z – составляющие силы резания, действующие на систему.

Динамическая составляющая толщины стружки с учетом вибраций в системе с двумя степенями свободы в двух перпендикулярных плоскостях после преобразований может быть выражена как:

$$h(t) = S_0 + x(t) - x \left(t - \left(T_0 + \frac{Z(t) - Z(t - T_0)}{\omega_0 \cdot R} \right) \right). \quad (6)$$

Выражая (5) через (6) получена зависимость составляющих силы резания от динамической толщины срезаемого слоя b :

для случая с двумя степенями свободы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} M_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = -K_x \cdot b \left[S_0 + x(t) - x \left(t - \left(T_0 + \frac{z(t) - z(t - T_0)}{\omega_0 \cdot R} \right) \right) \right] \\ M_z \ddot{z} + c_z \dot{z} + k_z z = -K_z \cdot b \left[S_0 + x(t) - x \left(t - \left(T_0 + \frac{z(t) - z(t - T_0)}{\omega_0 \cdot R} \right) \right) \right]. \end{cases} \quad (8)$$

Для решения этой системы уравнений необходимо определить:

1) эмпирические коэффициенты модели сил резания;

2) коэффициенты жесткости, массы колебательной системы, коэффициенты демпфирования.

По результатам расчетов вибрационных характеристик процессов резания, был сделан вывод о том, что жесткость технологических систем не должна быть меньше 10^7 Н/м , т. к. возникающие вибрации снижают стойкость режущего инструмента.

Рассмотренная система дифференциальных уравнений (8) не полностью отражает характер вибраций, так как линейные системы данного вида базируются на регенеративном механизме возбуждения вибраций и в системах с большой жесткостью и демпфированием дают результат с быстрым затуханием вибраций.

Экспериментальные исследования процесса механической обработки штока

Деталь «Шток» (рис. 2) входит в состав гидроцилиндра.

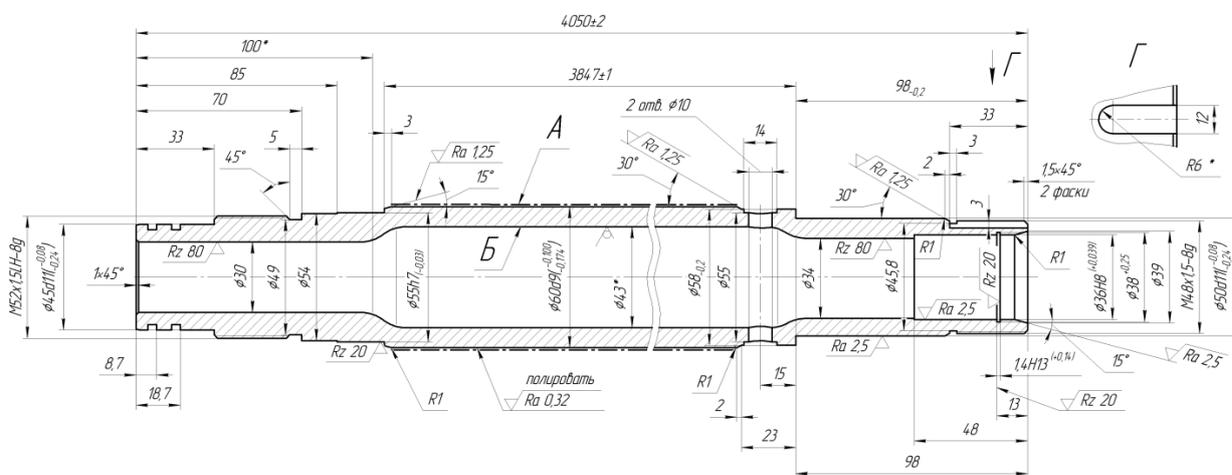


Рис. 2. Конструкция штока

Шток относится к типу длинномерных нежестких валов, то есть выполняется условие $l/d=10...20$: диаметр $60d9 \left(\begin{smallmatrix} -0,100 \\ -0,174 \end{smallmatrix} \right)$; длина 4050 мм; шероховатость поверхности $Ra_{max} 0,32$ мкм; толщина покрытия твердым хромом $h_{min} 20$ мкм. Материал детали – Сталь 45 ГОСТ

23270-89. В состоянии поставки твердость $HB269$.

Для герметичного соединения с рабочим цилиндром посредством втулок с уплотнениями необходимо высокое качество направляющей поверхности штока. Основной задачей при чистовой обра-

ботке штоков гидроцилиндров является достижение стабильности получения требуемых размеров и шероховатости поверхности.

Так как наружная поверхность штока работает в агрессивной среде и должна выдерживать большие нагрузки, то для упрочнения поверхностного слоя детали, повышения его износостойкости и обеспечения требуемой шероховатости поверхности применяется обкатка, полирование и хромирование наружной поверхности. Кроме уменьшения шероховатости поверхности после операции обкатки во многих случаях улучшаются также эксплуатационные свойства деталей машин.

Проведен анализ механической обработки штока (см. рис.2). Проблемы, возникающие при обработке детали «Шток»:

- использование неподвижного люнета для уменьшения отжима заготовки при проведении токарной обработки приводит к необходимости останавливать станок и переставлять люнет;
- отжим приводит к бочкообразности в средней части вала и вызывает вибрации инструмента;
- использование напайного инструмента с пластиной T15K6 не дает стабильного получения параметра шероховатости на операции чистового точения;
- после операции обкатки наблюдается ворсистость поверхности, которую приходится удалять шлифовальной шкуркой.

Токарную обработку предложено проводить на токарном обрабатывающем центре РЦМ8000 с проходным суппортом и подвижным люнетом.

Рассмотрены два токарных резца:

1. Резец фирмы Lamina серии STAR-LINE: державка ST-SXJBL 2525 M06, твердосплавные пластины ST-VBMT 060404LNNLT 10 и ST-DBMT 060404LNNLT 10 с углом резания 55° и 35° соответственно.

2. Резец фирмы Mitsubishi: державка CTGPL 2525 с пластинами TPGR 160308LNХ 2525 и TPGR 160304LNХ 2525, материал пластин металлокерамика NX 2525.

Для выбора инструмента с наилучшими показателями был проведен анализ твердотельной модели резцов с помощью программы Solidworks [9, 10]. По результатам статического анализа для заданных условий обработки при точении наружной поверхности штока $\varnothing 60(-0,12;-0,18)$ рекомендуется резец фирмы Mitsubishi, державка CTGPL2525, пластина TPGR 160308LNХ 2525.

Для проверки работоспособности и стабильности получаемых размеров и шероховатости поверхностей, определения периода стойкости пластин была проведена опытная промышленная обработка. Изменялась величина шероховатости поверхности заготовки после чистовой обработки. Ставился полнофакторный эксперимент $2^3 = 8$. Выявлена зависимость величины шероховатости обработанной поверхности после чистового точения от трех факторов:

частоты вращения заготовки p , глубины резания t и подачи режущего инструмента S .

Условия опытной обработки: деталь – шток; заготовка – Труба 73x15-35 ГОСТ 23270-78; количество деталей – 48; диаметр обрабатываемой поверхности $\varnothing 60d9$; длина обрабатываемой поверхности/длина детали – 3769/3942 мм; допуск нецилиндричности обработанной поверхности штока на всей длине 0,01...0,02 мм. Режимы резания $n = 214/250$ об/мин., $t = 2/1,5/1,2$ мм, $S = 0,26/0,3/0,33$ мм/об.

При увеличении либо уменьшении значения подачи наблюдалось уменьшение периода стойкости режущей кромки пластины. Уменьшение подачи приводит к износу по задней поверхности инструмента и снижению его стойкости. Увеличение подачи приводит к повышению температуры в зоне резания и износу по передней поверхности. Для предотвращения сильного нагрева режущей пластины применялось обильное охлаждение СОЖ «Cimstar 536».

Однако влияние подачи на стойкость инструмента несоизмеримо мало по сравнению со скоростью резания. Скорость резания, рекомендуемая производителем на данный тип инструмента, 200...300 м/мин. Скорость резания при обработке штоков $\varnothing 60d9$ принята $V \approx 40$ м/мин. При проведении экспериментальной обработки вибраций не возникло.

Была произведена обкатка двух деталей «Шток» новой конструкцией об-

катного инструмента с демпфирующей головкой [11–13]. Шероховатость поверхности $R_{\text{amax}} 0,32$ мкм – в соответствии с чертежом, ворсистости не наблюдалось.

Были проведены экспериментальные лабораторные исследования по определению зависимости величины шероховатости при обработке демпфирующим резцом. Полученные результаты позволяют утверждать, что при точении таким инструментом длинномерных нежестких валов возможно обеспечить шероховатость обработанной поверхности $R_{\text{amax}} 2,5$ мкм и увеличить производительность процесса за счет скорости резания [14].

Выводы

1. На основании проведенных промышленных испытаний обработки резцом фирмы Mitsubishi, державка CTGPL 2525 с пластинами TPGR 160308LNX 2525 с радиусом вершины $r=0,8$ мм установлено:

– шероховатость поверхности штока $\varnothing 60d9$ $Ra 9,53 \dots 9,7$ мкм и допуск нецилиндричности на всей длине 0,01...0,02 мм, что соответствует чертежу; период стойкости $T=470$ мин. на одной режущей кромке пластины, что соответствует 8 обработанным деталям. Пластина имеет 3 режущие кромки.

2. На основании проведенных лабораторных испытаний установлено:

– обкатка наружного диаметра $\varnothing 60d9$ двух деталей «Шток» новой конструкцией обкатного инструмента с

демпфирующей головкой позволяет получить шероховатость поверхности $R_a 2,5$ мкм в соответствии с чертежом, ворсистой не наблюдается;

– чистовая токарная обработка направляющей поверхности штока демп-

фирующим резцом обеспечивает стабильность получения заданного параметра шероховатости;

– обкатка инструментом с демпфирующей головкой позволяет устранить появление ворсистой поверхности.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 300 с.
2. Подураев В.П. Обработка резанием с вибрациями. М., 1970. 351 с.
3. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
4. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / Е.М. Макушок, Т.В. Калиновская, М.А. Москалев [и др.]; под ред. В.И. Беляева. Минск: Наука и техника, 1988. 184 с.
5. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
6. Позняк Г.Г. Повышение стабильности процесса резания на основе моделирования динамики рабочего пространства технологических систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: РУДН, 2002. 478 с.
7. Яковлев М. Г. Исследование динамики процесса резания при обработке жаропрочных материалов // Наука и образование. Эл № ФС 77 - 48211. 2009.
8. Яцун Е.И., Малыхин В.В., Новиков С.Г. Виброакустическая диагностика состояния режущего инструмента и микронеровностей обработанной поверхности // Справочник: инженерный журнал. 2014. № 4. С. 31 – 35.
9. SolidWorks 2007/2008 Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
10. Яцун Е.И., Малыхин В.В., Новиков С.Г. Повышение эксплуатационных характеристик демпфирующих резцов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. С.43-46.
11. Повышение устойчивости процесса точения демпфирующим резцом / Е.А. Кудряшов, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов, С.Г. Новиков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №3(36). С.122-125.
12. Пат. 2535196 Рос. Федерация: МПК В23В27/00/ Демпфирующий резец с управляемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, Н.В. Домарев, А.Е. Чижов, Ф.В. Новиков [и др.]; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-

Западный государственный университет» (ЮЗГУ). №2013113649/02; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28. 10 с.

13. Пат. 2479385 Рос. Федерация: МПК В23В27/00/ Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, Е.А. Кудряшов, Н.В. Домарев; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). №2011141683/02; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. №11. 8 с.

14. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск. 2016. 225 с.

Поступила в редакцию 17.01.2019

Подписана в печать 14.02.2019

Reference

1. Suslov A.G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 300 p.
2. Poduraev V.P. Obrabotka rezaniem s vibracijami. Moscow, 1970, 351 p.
3. Odincov L.G. Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Spravochnik. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p.
4. Makushok E.M., Kalinovskaja T.V., Moskalev M.A., eds. Teoreticheskie osnovy processov poverhnostnogo plasticheskogo deformirovanija; ed. by Beljaev V.I. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1988, 184 p.
5. Papshev D.D. Otdelochno-uprochnjajushhaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 152 p.
6. Poznjak G.G. Povyshenie stabil'nosti processa rezanija na osnove modelirovanija dinamiki rabocheho prostranstva tehnologicheskikh sistem. Diss. kand.tekhn.nauk. Moscow, RUDN Publ., 2002, 478 p.
7. Jakovlev M. G. Issledovanie dinamiki processa rezanija pri obrabotke zharo-prochnyh materialov. Nauka i obrazovanie. Izdatel' FGBOU VPO "MGTU im. N.Je. Baumana". Jel № FS 77 - 48211. 2009.
8. Jacun E.I., Malyhin V.V., Novikov S.G. Vibroakusticheskaja diagnostika sostojanija rezhushhego instrumenta i mikronerovnostej obrabotannoj poverhnosti. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*, 2014, no. 4, pp. 31 – 35.
9. Aljamovskij A. A., Sobachkin A. A., Odincov E. V., Haritonovich A. I., Ponomarev N. B. SolidWorks 2007/2008 Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike. Saint-Petersburg, 2008, 1040 p.

10. Jacun E.I., Malyhin V.V., Novikov S.G. Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik dempfirujushhijh rezcov. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii*, 2012, no.2, pp.43-46.

11. Malyhin V.V., Jacun E.I., Pavlov E.V., Novikov S.G. Povyshenie ustojchivosti processa tochenija dempfirujushhim rezcom. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3(36), pp.122-125.

12. Novikov S.G., Malyhin V.V., Jacun E.I., Domarev N.V., Chizhov A.E., Novikov F.V. [i dr.]. Dempfirujushhij rezec s upravljaemoj zhestkost'ju. Patent RF, no. 2535196, 2014.

13. Novikov S.G., Malyhin V.V., Jacun E.I., Kudrjashov E.A., Domarev N.V. Dempfirujushhij rezec s reguliruemoj zhestkost'ju. Patent RF, no. 2479385, 2013.

14. Jacun E.I., Malyhin V.V., Zubkova O.S., Novikov S.G. Instrumental'noe obespechenie processov mehanicheskoj obrabotki tverdymi splavami i kompozitami. Kursk, 2016, 225 p.

Received 17.01.2019

Accepted 14.02.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Елена Ивановна Яцун, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Машиностроительной технологии и оборудования», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: el.yatsun@gmail.com

Elena I. Yatsun, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: el.yatsun@gmail.com

Надежда Петровна Аникеева, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Архитектуры, градостроительства и графики», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: nadine2183@mail.ru

Nadezhda P Anikeeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Architecture and Town Planning, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: nadine2183@mail.ru

Иван Сергеевич Карнаухов, аспирант, кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: karnaukhov-92@mail.ru

Ivan S. Karnaukhov, Post-Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: karnaukhov-92@mail.ru