

УДК 621.9:531.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА ОРТОГОНАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ НА СТАНКАХ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

И. А. Туркин, Р. В. Русановский, А. И. Калинин

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рассматриваются вопросы математического моделирования динамики процесса обработки металлов на токарных станках с учетом влияния на этот процесс термодинамики обработки. В работе система резания описывается двумя степенями свободы, под одной понимаются деформации инструмента, а под другой — волновые колебания обрабатываемой детали. Цель данной работы — проведение исследований процессов обработки металлов на металлорежущих станках и установление оптимального режима резания, при котором деформации инструмента минимальны. В результате исследования выявлены факторы, влияющие на устойчивость процесса резания, и определены режимы, наиболее благоприятные для обработки. Таким образом, полученные результаты позволяют говорить о существовании некоторого оптимального режима резания, при котором деформации инструмента минимальны, или о существовании режима, максимально снижающего качество обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: токарная обработка, устойчивость процесса, деформации инструмента, качество обработки.

UDC 621.9:531.3

TEMPERATURE INFLUENCE ON THE DYNAMICS OF THE ORTHOGONAL CUTTING PROCESS IN METAL PROCESSING ON LATHE MACHINES

I. A. Turkin, R. V. Rusanovsky, A. I. Kalinin

Don state technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The article is devoted to the problems of the processing dynamics mathematical modeling of metals on lathes, taking into account the influence of the processing thermodynamics on this process. Thermodynamics refers to issues related to a change in the force reaction to the shaping movements of the tool during orthogonal turning. The dynamics of the cutting process in this case is complex and non-linear. In the article, the cutting system is described by two degrees of freedom; one denotes the deformation of the tool, and under the other wave oscillations of the workpiece. The factors affecting the stability of the cutting process are identified and the most favorable processing conditions are determined. Thus, the conducted studies allow us to talk about the existence of some optimal cutting mode, in which the deformation of the tool is minimal, or about the existence of a regime that worsens the quality of the machined surface.

Keywords: Turning, process stability, tool deformation, machining quality.

Введение. Динамика процесса обработки металлов на металлорежущих станках напрямую связана с вибрациями при деформации инструмента [1–10]. Эти вибрации имеют разную природу,

часть современных работ в области моделирования динамических характеристик металлорежущих станков указывает на природу процесса вибраций как результат запаздывания тангенциальной силы по отношению к нормально приложенному усилию [11–12]. Часть современных работ описывает сложную взаимосвязь процесса износа с эволюционными изменениями станков и инструментов [13–16]. Практически все работы, публикуемые в англоязычной литературе, указывают на регенеративную природу самовозбуждения колебаний инструмента [17]. Однако надо учитывать сложный характер влияния на динамику процесса резания свойств привода (двигателя), обеспечивающего резание [18]. Учитывая это, авторы в качестве основного фактора, определяющего вибрации, принимают термодинамику процесса резания, но с учетом регенерации колебаний при ортогональном точении изделий из металла.

Основная часть. Перед синтезом базовой математической модели рассмотрен в качестве общей схемы процесс ортогонального точения (отрезания) деталей на металлорежущих станках токарной группы (рис. 1).

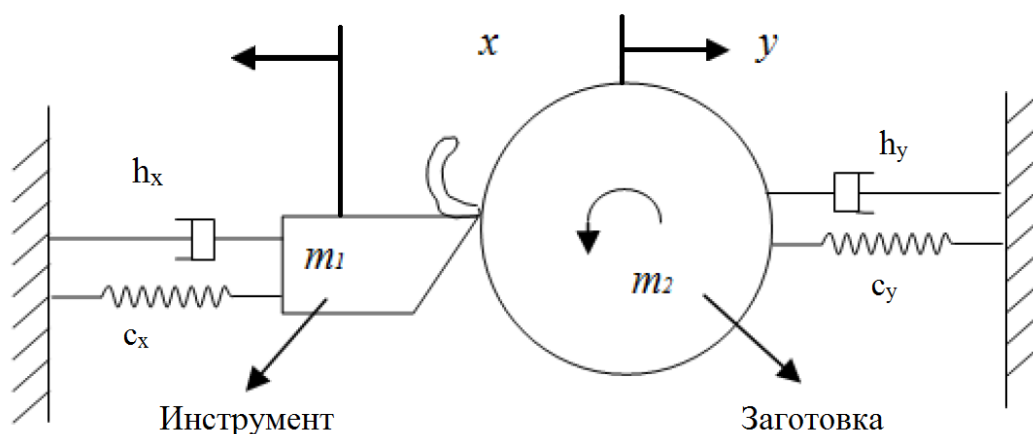


Рис. 1. Схема ортогонального резания при точении

Как видно на рис. 1, представлены деформационные движения инструмента и обрабатываемой детали, которые двигаются друг относительно друга в противоположные направления. Ось X характеризует деформации инструмента, а ось Y — деформации обрабатываемой детали. Массы инструмента и детали m_1 и m_2 соответственно, h_x и c_x — коэффициенты, характеризующие диссипативные и упругие свойства подсистемы инструмента, а h_y и c_y — коэффициенты, характеризующие диссипативные и упругие свойства подсистемы детали.

В контакте инструмента и обрабатываемой детали формируется площадка контакта, связанная с износом инструмента по задней грани, именно на этой площадке осуществляется перенос тепла от предыдущих шагов резания к текущим [14–16]. Энергия, выделяемая при этом, аккумулируется в новом срезаемом слое, это явление может быть описано следующим выражением:

$$kN = T_Q \frac{dQ}{dt} + Q, \quad (1)$$

где Q — температура в зоне резания;

N — мощность необратимых преобразований в зоне резания;

T_Q — постоянная времени термодинамической подсистемы системы резания;

k — коэффициент передачи в термодинамической подсистеме.

Динамика деформационных движений инструмента и обрабатываемой детали описывается следующей системой уравнений [1–10]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} + h_x \dot{x} + c_x x = F \\ m_2 \ddot{y} + h_y \dot{y} + c_y y = F \end{cases} \quad (2)$$

где F — это сила резания, которая согласно принятой в металлообработке гипотезе зависит от площади срезанного слоя [1–10, 17], а также от температуры в зоне резания [19–21]. С учетом этого выражение, описывающее силу резания, примет следующий вид:

$$F = \rho [t_p - x - y] V_p T h_3 \xi [1 + e^{-\alpha \theta}] \quad (3)$$

где ρ — предел прочности материала на разрыв;

t_p — заданная программой ЧПУ глубина резания;

V_p — заданная программой ЧПУ скорость подачи;

T — период вращения шпинделя;

h_3 — износ инструмента по задней грани;

α и ξ — идентифицируемые коэффициенты, описывающие степень влияния температуры на силу резания.

Мощность необратимых преобразований представляется как $N = F \sqrt{V^2 + V_p^2}$,

где V — скорость резания.

Таким образом, уравнения (1–3) и определяют математическую модель системы резания для случая, представленного на рис. 1.

Результаты моделирования. Синтезированная авторами математическая модель системы управления, представленная уравнениями (1–3), была промоделирована в пакете Matlab/Simulink в условиях отсутствия температурного влияния на силу резания и в условиях, когда в системе действует обратная связь по термодинамике процесса резания. Результаты моделирования с учетом влияния регенеративного эффекта без термодинамической подсистемы приведены на рис. 2.

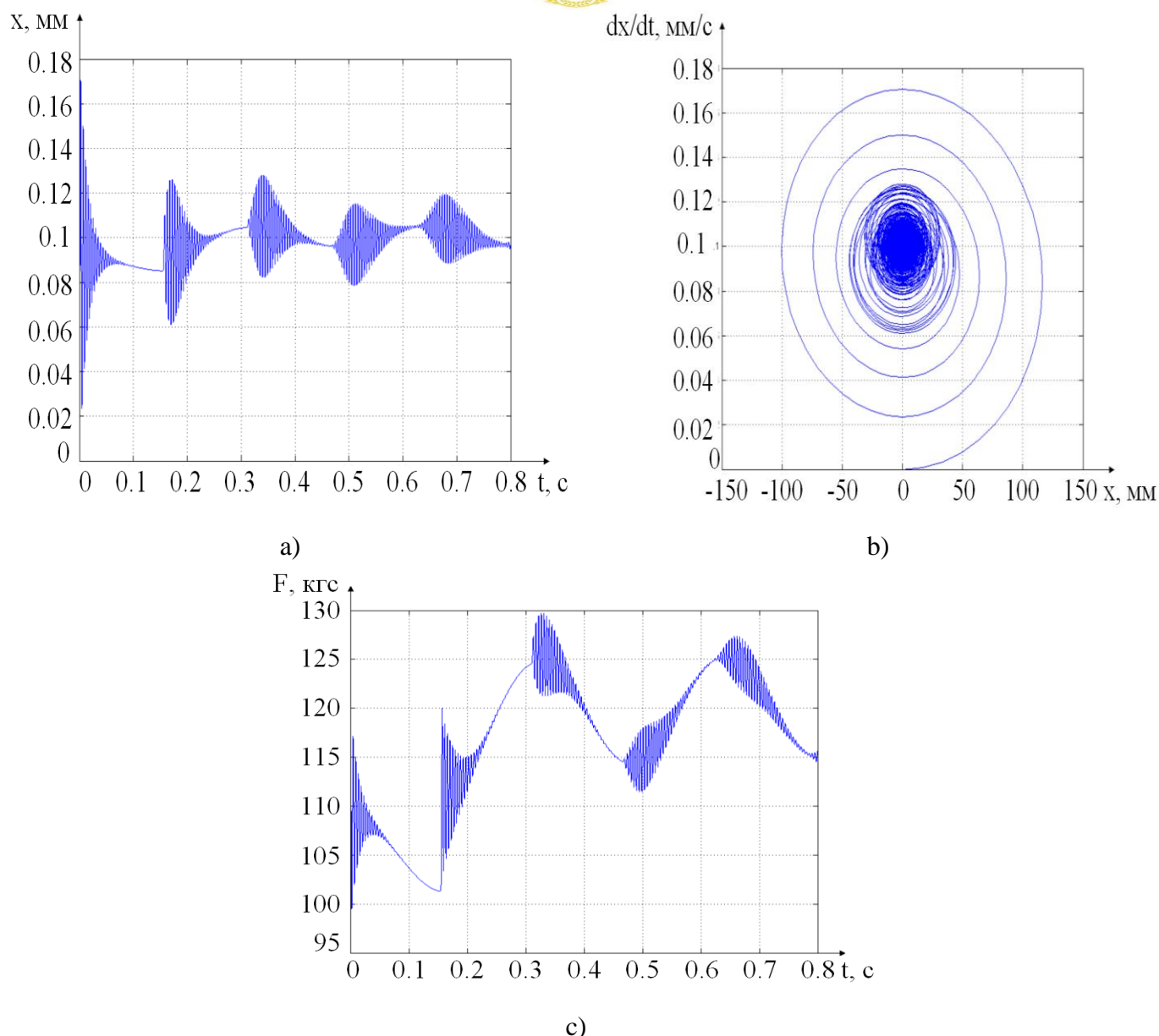


Рис. 2. Динамика системы без учета термодинамической подсистемы:
 а) переходный процесс по координате X ; б) фазовая траектория по координате X ;
 с) сила резания

Как видно на рис. 2, в случае действия регенеративного эффекта, который состоит в наложении одних колебаний на другие, без учета влияния на силу резания температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в системе будут наблюдаться незатухающие колебания по оси X , а также по оси Y . Отметим, что ось Y не представлена отдельным графиком, а видна из низкочастотной составляющей колебаний X и силы резания. Это связано с тем, что ее влияние не так сильно, как сильно влияние деформационных колебаний инструмента вдоль оси X . Вибрационные колебания инструмента, как видно на рис. 2 с, стремятся стянуться к некоторому предельному циклу, в окрестности которого они стабилизируются. Так как в представленной модели отсутствуют внешние источники вибраций, это показывает низкое качество процесса обработки. Однако в реальных системах управления резанием процесс резания носит, как правило, более устойчивый характер, по мнению авторов, это связано с влиянием на процесс термодинамической подсистемы. Для проверки этого утверждения авторами были проведены дополнительные исследова-

дования в среде Matlab/Simulink, результаты которых представлены на рис. 3, т. е. здесь представлены результаты моделирования всей системы управления с учетом всех уравнений (1–3).

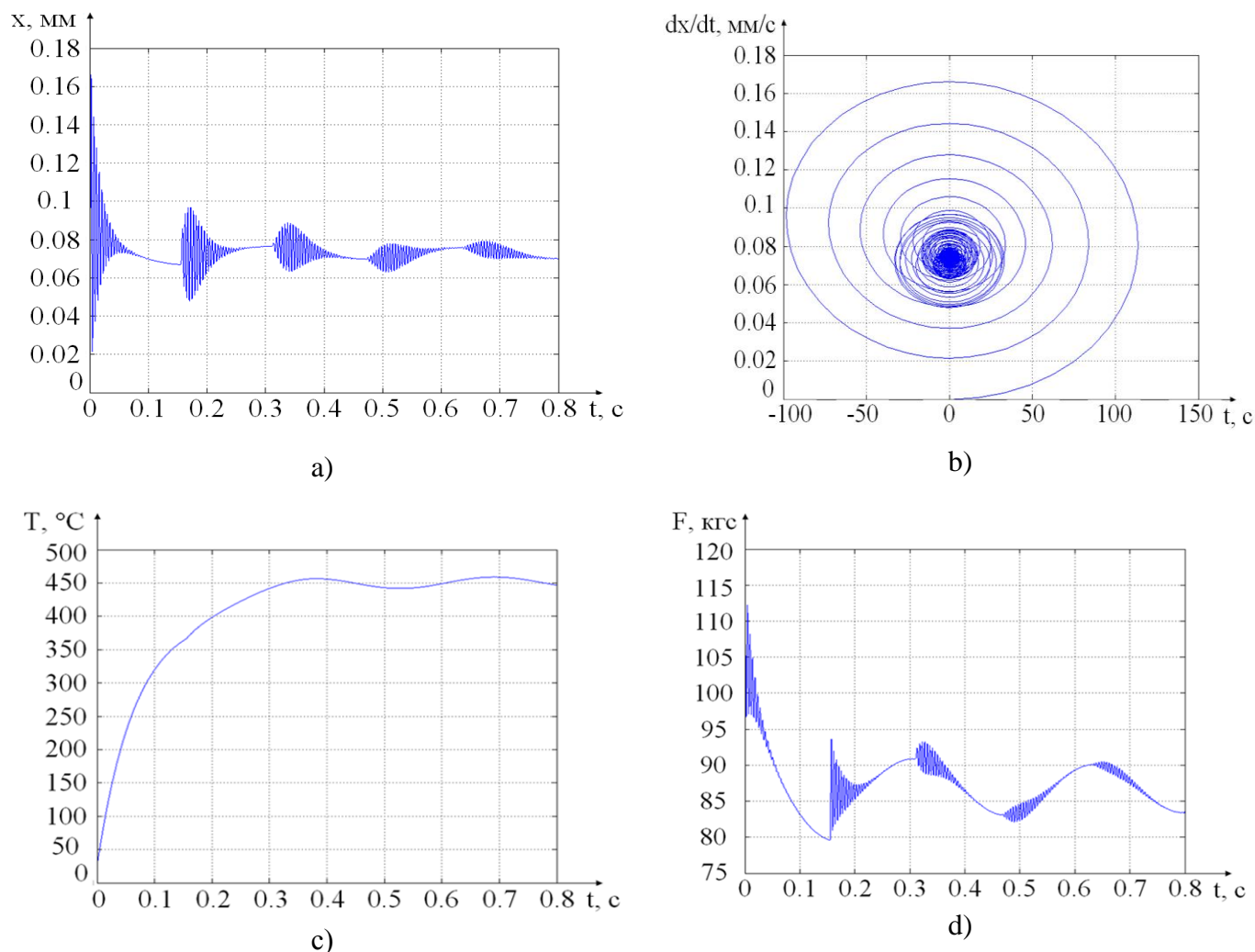


Рис. 3. Динамика системы с учетом термодинамической подсистемы:
 а) переходный процесс по координате X; б) фазовая траектория по координате X;
 в) температура в зоне резания; д) сила резания

Как видно на рис. 3, процесс резания, несмотря на очевидную регенерацию колебаний, существенным образом стабилизировался, что связано с влиянием термодинамической подсистемы на весь процесс. На рис. 3 а видно, как существенно уменьшается амплитуда деформационных колебаний инструмента, которые на фазовой траектории стягиваются к некоторому константному значению (рис. 3 б). При сопоставлении рис. 3 в и рис. 3 д видно, что после нарастания и стабилизации температуры в зоне резания сила резания плавно уменьшается, что и обеспечивает общую стабилизацию процесса обработки.

Заключение. Проведенные исследования показали, что для моделирования динамики процесса обработки резанием в условиях ортогональной токарной обработки металлов резанием необходимо учитывать стабилизирующее влияние термодинамической подсистемы резания. Исследования, проводимые без учета этой подсистемы, могут привести к появлению методологических ошибок, которые повлияют на качество полученных при этом результатов.

Библиографический список

1. Пятых, А. С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания / А. С. Пятых // Вестник ИрГТУ. — 2018. — Том 22, № 9. — С. 67–81.
2. Заковоротный, В. Л. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода / В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. — 2014. — № 3 (178). — С. 33–41.
3. Кравченко, С. А. Решение задачи повышения эффективности системы управления продольным профилем нежёстких валов при токарной обработке / С. А. Кравченко, А. Ю. Набилкин, В. П. Бирюков // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2011. — № 3 (58). — Вып. 2. — С. 206–212.
4. Быкадор, В. С. Влияние динамики процесса сверления на формирование погрешностей глубоких отверстий / В. С. Быкадор // Вестник Донского государственного технического университета. — 2010. — Т. 10, № 8 (51). — С. 1207–1218.
5. Лапшин, В. П. Влияние свойств сервопривода шпинделя на динамику сверления глубоких отверстий малого диаметра / В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2013. — Т. 13, № 5–6 (74). — С. 125–130.
6. Заковоротный, В. Л. Влияние параметров серводвигателей на динамические свойства системы сверления глубоких отверстий спиральными свёрлами / В. Л. Заковоротный, И. А. Туркин, В. П. Лапшин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 56–65.
7. Лапшин, В. П. Моделирование динамики формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра / В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Вестник Адыгейского государственного университета. — 2012. — № 4 (110). — С. 226–233.
8. Лапшин, В. П. Об одном частном случае синтеза системы управления процессом обработки металлов точением / В. П. Лапшин, Т. С. Бабенко, В. В. Христофорова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 75–84.
9. Лапшин, В. П. Оценка влияния скорости подачи на равновесные режимы привода, обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины / В. П. Лапшин, Р. А. Тюняев, В. В. Христофорова // Динамика технических систем : сб. трудов XII Междун. научно-техн. конференции. — Ростов-на-Дону, 2016. — С. 180–184.
10. Lapshin V. P., Turkin I. A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes // Russian Engineering Research. — 2015. — Т. 35. — №. 10. — С. 795-797.
11. Лапшин, В. П. Модель связи вертикальных деформаций с возникновением циркуляционных сил в системах «колесо — рельс» / В. П. Лапшин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 8–2 (59). — С. 1424–1431.
12. Лапшин, В. П. Модель связи упруго-вязкого смещения поверхности колеса относительно рельса с тяговыми характеристиками / В. П. Лапшин, И. А. Туркин, С. В. Носачев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — Т. 12, № 5 (66). — С. 40–49.
13. Кришталь, В. А. Оценка информативных признаков, раскрывающих интенсивность изнашивания инструмента при обработке металлов на металлорежущих станках / В. А. Кришталь, В. П. Лапшин, И. С. Радионова // Молодой исследователь Дона. — 2019. — № 3 (18). — С. 52–56.
14. Заковоротный, В. Л. Определение оптимальных траекторий при обработке с учётом эволюции процесса резания / В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, А. А. Губанова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2014. — Т. 14, № 3 (78). — С. 5–12.

15. Лапшин, В. П. Анализ процессов износа инструмента при точении металлов на металлорежущих станках / В. П. Лапшин, Т. С. Бабенко, И. С. Радионова // Молодой исследователь Дона. — 2018. — № 5 (14). — С. 73–78.

16. Lapshin V. P., Babenko T. S., Moiseev D. V. Experimental Evaluation of Influence of Tool Wear on Quality of Turning //International Conference on Industrial Engineering. – Springer, Cham, 2018. – С. 853-859.

17. Zakovorotny V. L., Lapshin V. P., Babenko T. S. Assessing the Regenerative Effect Impact on the Dynamics of Deformation Movements of the Tool during Turning //Procedia Engineering. — 2017. — Т. 206. – С. 68-73.

18. Лапшин, В. П. Электродвигатель постоянного тока — привод электромобиля / В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Автомобильная промышленность. — 2017. — № 1. — С. 16–18.

19. Заковоротный, В. Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В. Л. Заковоротный, И. А. Винокурова // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 3 (90). — С. 14–26.

20. Моделирование влияния температуры в зоне контакта инструмента и детали на динамику деформационных движений инструмента при токарной обработке / В. П. Лапшин [и др.] // СТИН. — 2019. — № 10. — С. 31–37.

21. Бордачев, Е. В. Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов / Е. В. Бордачев, В. П. Лапшин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 130–137.

Об авторах:

Туркин Илья Андреевич, доцент Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, tur805@mail.ru

Русановский Роман Викторович, студент Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), r.rusanovsky@yandex.ru

Калинин Антон Игоревич, магистрант Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), kalina-dom@rambler.ru

Authors:

Ilya Turkin Andreevich, associate professor of Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarina sq. 1), tur805@mail.ru

Rusanovskiy Roman Viktorovich, student of Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarina sq. 1), r.rusanovsky@yandex.ru

Kalinin Anton Igorevich, master student of Don State Technical University (344000, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarina sq. 1), kalina-dom@rambler.ru