

## Исследование регенеративных колебаний при токарной обработке нежестких валов

В.М. Свинин<sup>1 a</sup>, Е.А. Пешкова<sup>1 b</sup>, Д.В. Лобанов<sup>2 c</sup>, В.Ю. Скиба<sup>3 d</sup>

<sup>1</sup>Забайкальский государственный университет, ул. Александро-Заводская 30, Чита, Россия

<sup>2</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, Новосибирск, Россия

<sup>a</sup>svinin\_vm@mail.ru, <sup>b</sup>e\_v\_a\_1993@mail.ru, <sup>c</sup>mf\_nauka@brstu.ru, <sup>d</sup>skeeba\_vadim@mail.ru

Статья поступила 3.06.2016, принята 20.07.2016

*Рассмотрены особенности обработки нежестких валов на токарном технологическом оборудовании. Резерв повышения производительности технологических процессов изготовления изделий на станках с числовым программным управлением видится в интенсификации режимов обработки. Препятствием являются автоколебания, возникающие в технологической системе и ухудшающие показатели обработки, снижающие стойкость инструмента и долговечность технологического оборудования. Для подавления автоколебаний в последние годы используют модуляцию скорости резания. Возможности ее реализации на станках с числовым программным управлением сдерживает высокая инерционность шпиндельного узла. Для преодоления этого недостатка предлагается использовать механическое устройство гармонической модуляции скорости резания, располагаемое в конце кинематической цепи главного движения. В статье детально описаны конструкция и принцип работы устройства. С использованием устройства проведена серия опытов по чистовому точению нежесткой стальной заготовки, закрепленной в центрах токарно-винторезного станка. Описаны условия проведения опытов, в которых последовательно дискретно изменяли относительную (за оборот заготовки) частоту модуляции скорости резания в диапазоне 0...2,5 и ее глубину в пределах 0...40 %. Проведены анализ и интерпретация результатов исследований. Установлено, что модуляция скорости резания при целых значениях ее относительной частоты усиливает автоколебания, а при дробных значениях подавляет их. Выявлено, что для определения рационального значения в данном случае необходимо провести оптимизацию параметров эффективности гашения автоколебаний и минимума динамических нагрузок привода. Анализ проведенных исследований позволил доказать эффективность механического устройства синусоидальной модуляции скорости резания для подавления автоколебаний при точении нежестких валов. В результате исследований определены рациональные параметры модуляции скорости резания, которые рекомендованы для использования в производственных условиях при чистовом точении нежестких валов.*

**Ключевые слова:** точение; нежесткий вал; подавление регенеративных автоколебаний; параметры модуляции скорости резания.

## Examination of regenerative oscillations when turning non-rigid shafts

V.M. Svinin<sup>1 a</sup>, E.A. Peshkova<sup>1 b</sup>, D.V. Lobanov<sup>2 c</sup>, V.Yu. Skeeba<sup>3 d</sup>

<sup>1</sup>Transbaikal State University; 30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia

<sup>2</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University; 20, K. Marks ave., Novosibirsk, Russia

<sup>a</sup>svinin\_vm@mail.ru, <sup>b</sup>e\_v\_a\_1993@mail.ru, <sup>c</sup>mf\_nauka@brstu.ru, <sup>d</sup>skeeba\_vadim@mail.ru

Received 3.06.2016, accepted 20.07.2016

*Peculiarities for processing non-rigid shafts on the turning processing equipment have been considered. The reserve for increased productivity in technological processes of manufacturing products on numerically controlled machine tools is seen in the intensification of processing modes. The obstacle is self-oscillations, occurring in the process system and worsening the machining consequence, as well as reducing the tool life and durability of the processing equipment. To suppress self-oscillation, cutting velocity modulation has been used in recent years. The high response rate of a spindle unit restrains the opportunities to implement the modulation on NC machine tools. To overcome this drawback, a mechanical device of harmonic cutting velocity modulation has been proposed, which is located at the end of the kinematic chain of the main movement. Device construction and operation have been described in details. By using the device, a series of experiments have been conducted on finish turning of non-rigid steel billet, fixed in the centers of screw-cutting turning machine. Conditions have been described for conducting the experiments in which relative (per one billet rotation) frequency of cutting velocity modulation has been changed sequentially and discretely in the range of 0 ... 2.5 and its depth has been changed in the range of 0 ... 40%. The analysis and interpretation of research results have been done. It has been found out that the modulation of the cutting velocity increases self-oscillations with integer values of its relative frequency and suppresses them with fractional values. It has also been found out that to determine the rational value of this parameter, it is necessary to optimize the parameter of the efficiency of self-oscillation suppression and the parameter of the minimum of drive dynamic loads. The research analysis has allowed to prove the effectiveness for a mechanical device of sinusoidal cutting velocity modulation to suppress self-oscillations when turning non-rigid shafts. As a result of research, rational parameters for cutting velocity modulation have been determined and recommended to use in a production environment under finish turning of non-rigid shafts.*

**Key words:** turning; non-rigid shaft; suppression of regenerative self-oscillation; cutting velocity modulation parameters.

### Введение

Резерв повышения производительности технологических процессов изготовления изделий на станках с ЧПУ видится в интенсификации режимов обработки. Однако препятствием в этом случае, как правило, являются автоколебания, возникающие в технологической системе (ТС) и ухудшающие точностные и качественные показатели обработки, снижающие стойкость инструмента и долговечность технологического оборудования. Одним из примеров является токарная чистовая обработка нежестких валов. Возбуждение автоколебаний при точении с малой глубиной резания, как правило, связано с малой величиной фактического главного угла в плане радиусного лезвия на вершине резца и регенеративным эффектом [1; 2]. С учетом распространенности нежестких валов в узлах и агрегатах различных машин и механизмов и повышающихся требований к их качеству задача изыскания способов подавления автоколебаний в процессе резания является актуальной для современного машиностроения.

На практике гашение автоколебаний при точении валов ведут путем применения люнетов, демпферов и динамических виброгасителей различных типов, конструкции которых зачастую громоздки, неудобны в эксплуатации и требуют дополнительных затрат времени на настройку, что снижает производительность обработки [3–6].

Ранее для подавления регенеративных автоколебаний в технологических системах металлорежущих станков и дробления сливной стружки использовали модуляцию скорости резания, ее низкочастотное периодическое изменение [7; 8]. Исследования в этой области проводят как в России, так и за рубежом [9–20].

Для модуляции скорости резания исследователи использовали системы числового программного управления станками. Однако не все предприятия нашей страны имеют технологическое оборудование, оснащенное такими системами. Это определяет необходимость разработки специальных устройств модуляции скорости резания для универсальных станков. Опыт показывает, что для исключения негативного влияния инерционности шпинделя станка такого рода устройства целесообразно располагать в конце кинематической цепи привода главного движения станка, т. е. непосредственно на шпинделе.

Основной задачей применения модулированной скорости резания является установление ее рациональных параметров: характера, частоты и глубины. На сегодняшний день этот вопрос изучен недостаточно. В связи с вышесказанным, целью нашего исследования является проектирование механического устройства гармонической модуляции скорости резания для чистовой точения нежестких валов.

**Методика проведения исследований.** Устройство спроектировано для токарно-винторезного станка мод. УТ16П, на котором оно устанавливается вместо трехкулачкового патрона (рис. 1).

Сборочный чертеж устройства представлен на рис. 2. Устройство содержит оправку 1, закрепляемую

с помощью шомпола в конусной расточке переднего конца шпинделя станка.

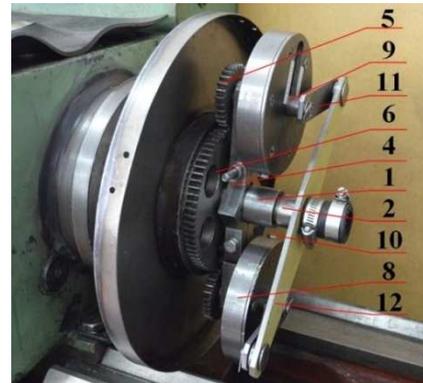


Рис. 1. Устройство модуляции скорости резания (общий вид со снятым кожухом)

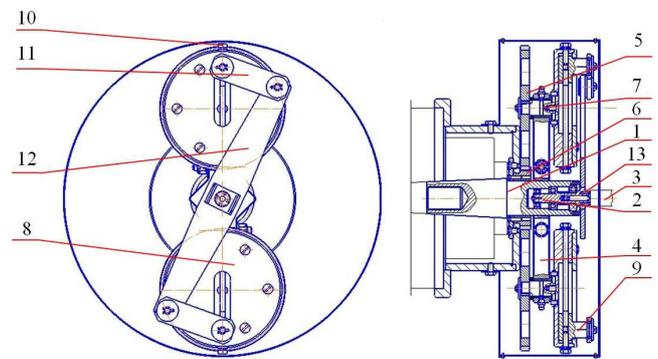


Рис. 2. Сборочный чертеж устройства модуляции скорости резания

В расточке переднего конца оправки на подшипниках установлен вращающийся центр 2, служащий для поддержания заготовки 3. На оправке 1 размещена поперечная державка 4, несущая две шестерни 5, находящиеся в зацеплении с неподвижным зубчатым колесом 6, закрепленным на гильзе шпинделя.

На осях 7 шестерен 5 закреплены два маховика 8 с размещенными в них ползушками 9, одинаковое радиальное положение которых можно регулировать установочными винтами 10. Оси ползушек через тяги 11 связаны с поперечным поводком 12, передающим поперечным врезным ножам вращение заготовке 3.

Устройство работает следующим образом. Вращение шпинделя через оправку 1 передается державке 4, заставляя шестерни 5 обегать зубчатое колесо 6. Вращение шестерен 5 передается маховикам 8, которые совершают сложное вращение — вокруг своих осей и вокруг оси оправки.

Оси ползушек 9 через тяги 11 увлекают поводок 12, заставляя его вращаться. Если положение осей ползушек 9 совпадает с осями вращения шестерен 5, то вращение поводка 12 будет равномерным. Чем больше оси ползушек 9 смещены от своего центрального положения, тем больше глубина модуляции угловой скорости вращения поводка, а, следовательно, и заготовки.

Относительная частота модуляции за оборот шпинделя  $f_{\text{мод}}$  определяется соотношением чисел зубьев колеса  $z_1$  и шестерен  $z_2$  (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение чисел зубьев колеса  $z_1$  и шестерен  $z_2$  для разных значений относительной частоты модуляции  $f_{\text{мод}}$

$f_{\text{мод}}$	0.5	1	1.5	2	2.5
$z_1$	33	50	57	67	71
$z_2$	67	50	43	33	29

Исследование процесса точения с использованием устройства модуляции скорости резания проводили на

токарно-винторезном станке модели УТ16П. На задней бабке станка установлен кронштейн для бесконтактных токовихревых датчиков модели AP2000A-08.05.0, которые регистрировали горизонтальные и вертикальные колебания заготовки. Сигналы от датчиков через АЦП модели ZETLab 210 поступали на персональный компьютер, на экране которого отображались виброграммы колебаний заготовки в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для определения частотного спектра виброграмм (рис. 3) числовые массивы данных подвергали анализу Фурье с помощью программы из пакета «MatLab».

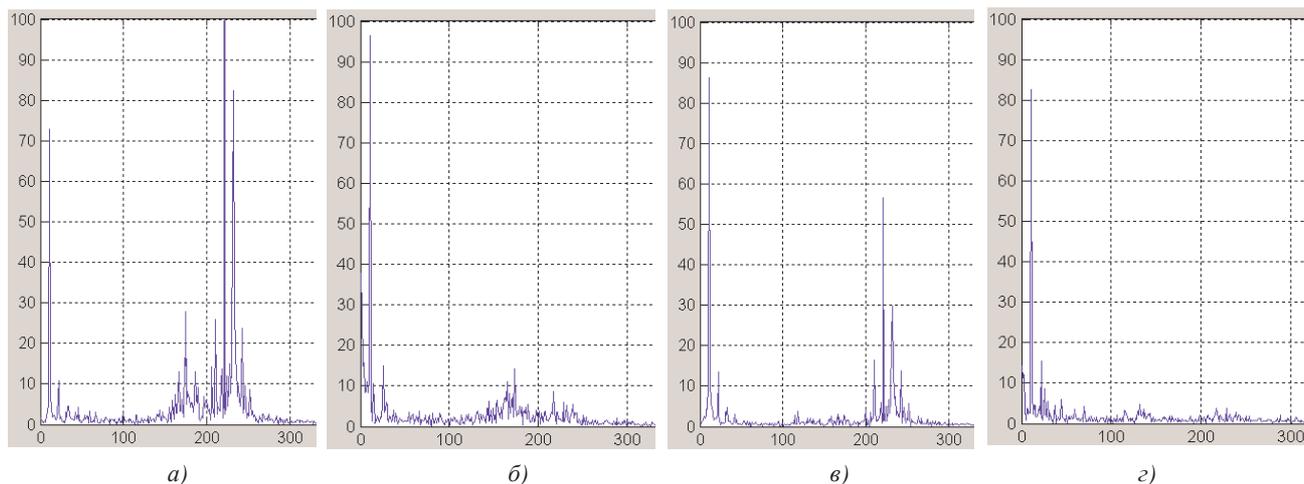


Рис. 3. Спектрограммы вертикальных (а, б) и горизонтальных (в, з) колебаний заготовки при точении с равномерной (а, в) и модулированной (б, з) скоростью резания при модуляции с относительной частотой 1,5 и глубиной 30 %

Для оценки эффективности подавления автоколебаний была проведена серия опытов по точению ( $n = 630$  мин  $-1$ ,  $S = 0,109$  мм/об,  $t = 0,5$  мм) заготовки из стали 45 ( $HV = 198$ ) диаметром 20 мм и длиной 427 мм, закрепленной в центрах. Обработку проводили без СОЖ токарным проходным резцом с припаянной пластинкой из твердого сплава Т5К10 ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\gamma = -6^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм). Модуляцию скорости резания глубиной от 0 до 40 % создавали устройством последова-

тельно, на относительных частотах 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 за оборот заготовки.

**Результаты и обсуждение.** Обработка результатов опытов (табл. 2) позволила построить графики влияния глубины модуляции скорости резания на амплитуду вертикальных, горизонтальных и результирующих автоколебаний при варьировании относительной частоты модуляции (рис. 4).

Таблица 2

Влияние частоты и глубины модуляции скорости резания на амплитуду автоколебаний

№ опыта	Частота модуляции	Глубина модуляции, %	Радиальное смещение ползушки, мм	Амплитуда автоколебаний, мкм		
				горизонтальных	вертикальных	результирующая
1	0,5	0	0	55,5	135	145,96
2		5	10	9,5	28	29,57
3		10	20	8	76,1	76,52
4		15	22	15,8	35	38,40
5		20	26	18,8	35,4	40,08
6	1	0	0	31,6	33,4	45,98
7		10	7	15,9	37,8	41,00
8		20	15	64,1	157,1	169,67
9		30	24	5,5	21,2	21,90
10		40	31	4,4	7,2	8,44
11	1,5	0	0	56,5	142,5	153,29
12		10	7	22,2	49,4	54,16

№ опыта	Частота модуляции	Глубина модуляции, %	Радиальное смещение ползушки, мм	Амплитуда автоколебаний, мкм		
				горизонтальных	вертикальных	результатирующая
13		20	15	11	26,2	28,41
14		30	24	3,7	6	7,05
15		40	30	6,3	11,8	13,38
16	2	0	0	11,5	36,5	38,27
17		10	5	24,7	54,2	59,56
18		20	10	14,6	23,8	27,92
19		30	15	21,5	72,5	75,62
20	2,5	40	20	21,1	10,1	23,39
21		0	0	26,9	68	73,13
22		10	4	25,8	53,3	59,21
23		20	8	15,5	22,1	27,00
24		30	13	5,4	12,3	13,43
25		40	16	11,5	16	19,70

Как видно на графиках, целые значения относительной частоты модуляции 1 и 2 не оказывают положительного влияния на динамику технологической системы. Наоборот, с ростом глубины модуляции скорости резания наблюдается устойчивая тенденция к росту амплитуды доминирующей гармоники автоколебаний. Модуляция скорости резания на дробных значениях относительной частоты 0,5; 1,5; и 2,5 увеличивает динамическую устойчивость технологической системы. При относительной частоте модуляции 0,5 увеличение глубины с 0 до 5 % приводит к уменьшению результирующей амплитуды автоколебаний с 146 до 30 мкм. Последующее повышение глубины модуляции до 10 % увеличивает амплитуду результирующих автоколебаний до 76,5 мкм. Дальнейший рост глубины модуляции способствует ослаблению автоколебаний. При относительной частоте модуляции 1,5 и 2,5 происходит монотонное уменьшение амплитуды результирующих автоколебаний соответственно с 153 до 7 мкм и с 73 до 13 мкм при изменении глубины модуляции от 0 до 30 %. Дальнейшее увеличение глубины модуляции до 40 % немного повышает результирующую амплитуду автоколебаний.

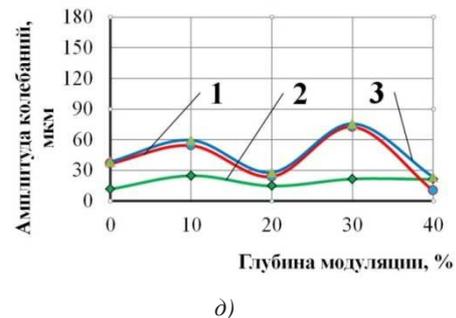
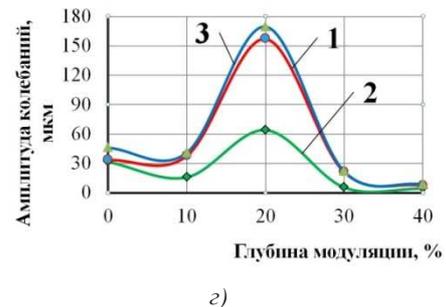
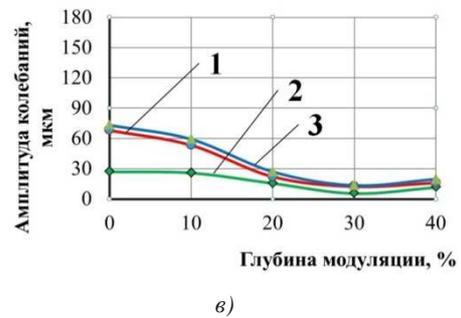
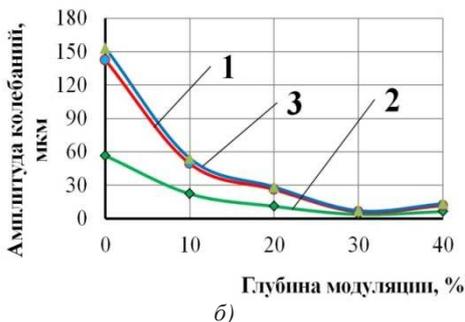
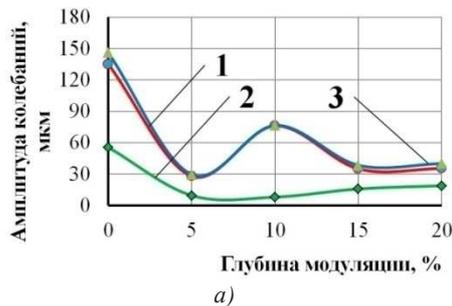


Рис. 4. Влияние глубины модуляции скорости резания на амплитуду вертикальных (1), горизонтальных (2) и результирующих (3) автоколебаний при относительной частоте модуляции: а — 0,5; б — 1,5; в — 2,5; г — 1,0; д — 2,0

Таким образом, лучший результат гашения автоколебаний — в 22 раза — наблюдается при относительной частоте модуляции 1,5 и глубине модуляции 30 %. При частоте модуляции 2,5 результирующая амплитуда автоколебаний уменьшилась в 5 раз.

Эти результаты иллюстрируют уменьшение амплитуды автоколебаний на спектре их частот (рис. 3). Анализируя полученные данные, следует отметить, что при повышении глубины модуляции следы автоколебаний исчезают при дробном значении относительной частоты 1,5 и остаются при целом ее значении 2,0.

Полученные результаты можно объяснить с позиции теории регенеративных автоколебаний [1; 10]. Относительная частота модуляции скорости резания  $f_{\text{мод}}$  определяет количество периодов ее изменения за один оборот заготовки. Для разрушения механизма регенерации автоколебаний в технологической системе величина  $f_{\text{мод}}$  должна выбираться из условия обеспечения максимальной разности скоростей при прохождении лезвием одного и того же участка поверхности резания на предыдущем и последующем оборотах заготовки. При целых ее значениях изменение скорости резания на всех оборотах заготовки происходит одинаково, т. е. каждому угловому положению заготовки соответствует своя определенная скорость вращения, синхронно повторяющаяся на следующих оборотах. В этом случае технологической системе ничего не мешает подстроить фазу своих колебаний относительно следа, и амплитуда автоколебаний достаточно быстро достигает некоторой установившейся величины.

### Выводы

При дробных значениях  $f_{\text{мод}}$  изменение скорости резания на предыдущем и последующих оборотах заготовки происходит различным образом. Это обуславливает разность скоростей прохождения лезвием инструмента каждой точки поверхности резания на смежных проходах и предотвращает развитие регенеративных автоколебаний. Наибольшая разность скоростей резания достигается при значениях  $f_{\text{мод}}$ , равных 0,5; 1,5; 2,5 и т. д. Вместе с тем, повышение величины  $f_{\text{мод}}$  сопровождается пропорциональным ростом динамических нагрузок привода главного движения станка. Для определения рационального значения этого параметра необходимо провести оптимизацию между параметрами эффективности гашения автоколебаний и минимума динамических нагрузок привода.

Анализ проведенных исследований позволил доказать эффективность механического устройства синусоидальной модуляции скорости резания для подавления автоколебаний при точении нежестких валов. В результате исследования определены рациональные параметры модуляции скорости резания, которые рекомендованы для использования в производственных условиях при чистовом точении нежестких валов.

### Литература

1. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке // СТИН. 2006. № 1. С. 7-13.
2. Vogler V.P., De Vor R.E., Kapoor S.G. Nonlinear Influence of Effective Lead Angle in Turning Process Stability // ASME J. Manuf. Sci. Eng. 2002. Vol. 124. P. 473-475.
3. Bisu C.F., Gérard A., K'nevez J-Y., Laheurte R., Cahuc O. Self-excited vibrations in turning: forces torsor analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 44. P. 447-462. DOI: 10.1007/s00170-008-1850-5.

4. Драчев О.И., Кравцов А.Н. Автоматическое управление процессом точения маложестких деталей. Тольятти, 2012. 250 с.
5. Han X., Ouyang H., Wang M., Hassan N., Mao Y. Self-excited vibration of workpieces in a turning process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 226. № 8. P. 1958-11970. DOI: 10.1177/0954406211435880.
6. Быков Г.Т., Дорохин Н.Б., Маликов А.А., Ямников А.С. Точение нежестких заготовок многолезвиевыми головками с подвижным лонетом-виброгасителем // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2009. № 1. С. 173-177.
7. Шнепс В.А. Вопросы динамики и прочности. Рига: Зинатне, 1970. Вып. 20. С. 123-130.
8. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
9. Афонина Н.А. Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2004. 182 с.
10. Свинин В.М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний // Вестн. СамГТУ. Сер. Техн. науки. 2006. № 41. С. 135-142.
11. Свинин В.М., Пешкова Е.А. Исследование влияния параметров модуляции скорости резания на подавление регенеративных автоколебаний при чистовом точении нежестких валов // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 57-64.
12. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов: кол. моногр. / под ред. А.В. Киричека. М.: Спектр, 2014. 255 с.
13. Bisu C.F., Darnis P., Gérard A., K'nevez J-Y. Displacements analysis of self-excited vibrations in turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 44, № 1. P. 1-16. doi: 10.1007/s00170-008-1815-8.
14. Siddhpura M., Paurobally R. Experimental Investigation of Chatter Vibrations in Facing and Turning Processes // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2013. Vol. 7. P. 6.
15. Siddhpura M., Paurobally R. Chatter stability and tool wear predictions in the presence of chatter vibrations for orthogonal turning process // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2013. Vol. 11. № 2, P. 67-82. doi: 10.7158/M12-019.2013.11.2.
16. Paul P.S., Varadarajan A.S., Gnanadurai R.R. Study on the influence of fluid application parameters on tool vibration and cutting performance during turning of hardened steel // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2016. Vol. 19, № 1. P. 241-253. doi:10.1016/j.jestch.2015.07.017.
17. Gutnichenko O., Bushlya V., Zhou J.M., Stahl J.-E. Tool Wear and Vibrations Generated When Turning High-chromium White Cast Iron with pCBN Tools // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46, P. 285-289. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.005.
18. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyskin A.V., Parts K.A. Hybrid Processing: the Impact of Mechanical and Surface Thermal Treatment Integration onto the Machine Parts Quality // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 126. P. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.
19. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated Processing: Quality Assurance Procedure of the Surface Layer of Machine Parts during the Manufacturing Step "Diamond Smoothing" // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 125. P. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
20. Overcash J.L., Cuttino J.F. Design and experimental results of a tunable vibration turning device operating at ultrasonic frequencies // Precision Engineering. 2009. Vol. 33. № 2. P. 127-134. doi:10.1016/j.precisioneng.2008.04.006.

## References

1. Svinin V.M. Self-organization of the secondary self-oscillation at blade machining // *STIN*. 2006. № 1. P. 7-13.
2. Vogler V.P., De Vor R.E., Kapoor S.G. Nonlinear Influence of Effective Lead Angle in Turning Process Stability // *ASME J. Manuf. Sci. Eng.* 2002. Vol. 124. P. 473-475.
3. Bisu C.F., Gérard A., K'nevez J-Y., Laheurte R., Cahuc O. Self-excited vibrations in turning: forces torsor analysis // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 44. P. 447-462. DOI: 10.1007/s00170-008-1850-5.
4. Drachev O.I., Kravtsov A.N. Automatic control of the process of turning non-rigid parts. *Tol'yatti*, 2012. 250 p.
5. Han X., Ouyang H., Wang M., Hassan N., Mao Y. Self-excited vibration of workpieces in a turning process // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012. Vol. 226. № 8. P. 1958-11970. DOI: 10.1177/0954406211435880.
6. Bykov G.T., Dorokhin N.B., Malikov A.A., Yamnikov A.S. Turning nonrigid workpieces lot of cutter heads with movable lunette-vibration damper // *Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2009. № 1. P. 173-177.
7. Shneps V.A. Experimental study of the effect of the rate of change in the sinusoidal cutting resistance. *Riga: Zinatne*, 1970. Vyp. 20. P. 123-130.
8. Poduraev V.N. Machining with vibrations. M.: Mashinostroenie, 1970. 350 p.
9. Afonina N.A. Increased vibration resistance turning process on the basis of controlled vibrations of the cutting speed: dis. ... kand. tekhn. nauk. Tula, 2004. 182 p.
10. Svinin V.M. The choice of cutting speed modulation parameters for regenerative damping of oscillation // *Vestn. of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2006. № 41. P. 135-142.
11. Svinin V.M., Peshkova E.A. Study of the influence of modulation parameters cutting speed for suppression of regenerative self-oscillation in finish turning non-rigid shafts // *Mekhaniki XXI veku*. 2016. № 15. P. 57-64.
12. Effective technology machining of nonmetallic materials: kol. monogr. / pod red. A.V. Kiricheka. M.: Spektr, 2014. 255 p.
13. Bisu C.F., Darnis P., Gérard A., K'nevez J-Y. Displacements analysis of self-excited vibrations in turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 44, № 1. P. 1-16. doi: 10.1007/s00170-008-1815-8.
14. Siddhpura M., Paurobally R. Experimental Investigation of Chatter Vibrations in Facing and Turning Processes // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2013. Vol. 7. P. 6.
15. Siddhpura M., Paurobally R. Chatter stability and tool wear predictions in the presence of chatter vibrations for orthogonal turning process // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 11. № 2, P. 67-82. doi: 10.7158/M12-019.2013.11.2.
16. Paul P.S., Varadarajan A.S., Gnanadurai R.R. Study on the influence of fluid application parameters on tool vibration and cutting performance during turning of hardened steel // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016. Vol. 19, № 1. P. 241-253. doi:10.1016/j.jestch.2015.07.017.
17. Gutnichenko O., Bushlya V., Zhou J.M., Stahl J.-E. Tool Wear and Vibrations Generated When Turning High-chromium White Cast Iron with pCBN Tools // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 46, P. 285-289. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.005.
18. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshekin A.V., Parts K.A. Hybrid Processing: the Impact of Mechanical and Surface Thermal Treatment Integration onto the Machine Parts Quality // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. Vol. 126. P. 012016. doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.
19. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebea P.Yu. Integrated Processing: Quality Assurance Procedure of the Surface Layer of Machine Parts during the Manufacturing Step "Diamond Smoothing" // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. Vol. 125. P. 012031. doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
20. Overcash J.L., Cuttino J.F. Design and experimental results of a tunable vibration turning device operating at ultrasonic frequencies // *Precision Engineering*. 2009. Vol. 33. № 2. P. 127-134. doi:10.1016/j.precisioneng.2008.04.006.