УДК 621.941.025.7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦОВ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ

Рогов В.А., Горбани С.

Российский университет дружбы народов, Москва, e-mail: vladimirrogov@yandex.ru

Чтобы получить требуемое качество поверхности путем механической обработки, выбор параметров режимов резания имеет большое значение. Это может быть достигнуто за счет улучшения качества и производительности режущего инструмента. В данной статье представлено влияние конструкции державки сборного токарного резца на шероховатость обработанной поверхности заготовки в процессе точения. Также рассмотрено изменение шероховатости при варьировании значением вылета резца, частоты вращения шпинделя, подачи и глубины резания. В качестве обрабатываемой детали использованы три заготовки из чугуна, стали и алюминия. Эксперименты выполнялись на токарно-винторезном станке модели 16К20ВФ1. Используя однофакторный анализ, результаты экспериментов показали, что увеличение частоты вращения и вылета резца, уменьшение подачи и глубины резания улучшает шероховатость поверхности. Шероховатость поверхности алюминия имеет наименьшее значение, а чугуна – наибольшее. После проведения экспериментов также получены оптимальные режимы резания для каждого материала, при которых получилась наилучшая шероховатость. При точении деталей с использованием цельнометаллического резца получается лучшая шероховатость поверхности, благодаря более высокой жесткости.

Ключевые слова: сборный токарный резец, шероховатость поверхности, режим резания, износ инструмента, однофакторный эксперимент

INVESTIGATION OF THE MACHINING PARAMETERS FOR THE FINISH TURNING

Rogov V.A., Ghorbani S.

People`s Friendship University of Russia, Moscow, e-mail: vladimirrogov@yandex.ru

To obtain the required surface quality by machining, cutting parameter selection is important. This can be achieved by improving the quality and performance of cutting tools. This paper presents the effect of the construction of the tool holder on the surface roughness in turning. Also the changes of the surface roughness by varying the value of the tool overhang, cutting speed, feed rate and depth of cut are considered. It was used three different workpieces made of aluminum, steel and cast iron. The experiments were carried out on the lathe model 16K20VF1. Using single-factor experiment, results of the experiments showed that the increase in speed and tool overhang, reduction in feed rate and depth of cut improves the surface roughness. At the end of the experiments it was obtained the optimum cutting conditions for each material, where the surface roughness was the best. The surface roughness of aluminum has the smallest value and cast iron – the greatest. Turning of the workpieces using metallic tool gets better surface roughness, due to its high rigidity.

Keywords: turning tool assembly, surface roughness, cutting conditions, tool wear, single-factorial design

При обработке металлов резанием режущим инструментом срезается определенный слой материала с поверхности заготовки и таким образом получается требуемая форма, размер и качество поверхности детали [3], которые являются основной целью науки резания металлов. При этом точение является одним из самых распространенных и освоенных методов изготовления деталей типа тел вращения.

Системный анализ процесса точения сборными токарными резцами показал, что при обработке режущий инструмент изнашивается, параметры сечения среза, а также направления и точки приложения вектора силы резания изменяются, жёсткость технологической системы (ТС) на разных участках обрабатываемой поверхности различна, появляются вибрация и тепловые деформации технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД). Вследствие вышеуказанных условий ухудшается качество обработанных поверхностей [3, 11].

Шероховатость поверхности стала самым значительным техническим требованием, поскольку она является одним из самых важных показателей качества поверхностного слоя изделия. Требования к качеству выпускаемой продукции постоянно повышаются, что заставляет производителей улучшать точность и физико-механические характеристики обрабатываемых поверхностей [5]. Кроме того, качество обработанной поверхности используется в качестве важного параметра при диагностике стабильности процесса обработки, где ухудшение поверхности может указывать неоднородность материала заготовки, износ, вибрации режущего инструмента и т.п. [6]. По этим причинам важно поддерживать высокое качество обрабатываемых поверхностей, что особенно важно при современных требований при обработке изделий на наноуровне, которая должна осуществляться в пределах 100 нм. Однако достижение хорошего качества поверхности ведёт

к значительным экономическим затратам при реализации производственных процессов.

Сложность и неоднозначность процесса резания металлов позволяет предположить, что возникновение шероховатости определяется рядом факторов, которые действуют одновременно. В зависимости от конкретных условий некоторые из них могут доминировать. Среди этих условий следует выделить режимы резания (скорость, подача и глубина резания), вид обработки, жесткость и демпфирующую способность элементов технологической системы, а также свойства обрабатываемого материала, которые теоретически и экспериментально исследованы во многих научно-исследовательских работах [1, 2, 7–15]. Результаты этих исследований показали, что при резании различных материалов низкая скорость резания (v), большая подача (s) и глубина резания (t), большой вылет (L), неровности режущей кромки резца, меньший размер поперечного сечения режущего инструмента и низкая жесткость технологической системы увеличивают вибрацию, вследствие чего ухудшается состояние поверхностного слоя.

При повышении требований к качеству и точности обработки стараются использовать более жесткий инструмент, который бы минимально отклонялся под действием сил резания [2]. Но такой инструмент хорошо поддерживает и сам является генератором высокочастотных колебаний, которые существенно влияют на шероховатость обработки, особенно при нанорезании. В этом случае предпочтительнее инструмент, который обладает меньшей жёсткостью, но лучшими демпфирующими характеристиками. В процессе резания его деформация (изгиб державки у резца) будет незначительна (особенно при чистовой обработке), но при этом он будет хорошо гасить колебания, и режущая кромка будет занимать стабильное положение относительно обрабатываемой поверхности. Необходимо учитывать, что из-за структурных превращений в материале заготовки, при высокой температуре (1000–1100 °C) резания, возникающей в зоне контакта резца и заготовки, изменяются механические свойства обрабатываемого материала [3]. Следовательно, конструкция режущего инструмента должна быть такой, чтобы не реагировать на уровень температуры в зоне резания.

Целью данного исследования является изучение: 1 – влияния параметров режима резания на качество обрабатываемой поверхности, и 2 – разработка конструкции сборного токарного резца, и оценка разработанной модели на качество обрабатываемой поверхности по сравнению с цельнометаллическим резцом. С этой целью для проведения экспериментов в качестве заготовки использованы три заготовки из стали, алюминия и чугуна.

Методика проведения исследований

В данном исследовании использовались стандартный сборный токарный резец и резец со сквозными горизонтальными отверстиями в державке, расположенными в шахматном порядке (Ø10 мм) со сменными многогранными пластинами (СМП) и с габаритными размерами 150×27×27 мм. Материал державок резцов – закаленная сталь 40, а материал СМП – твердый сплав марки СТ35М с углом при вершине 80°, производитель Sandvik Coromant. Форма СМП: четырёхгранная с отверстием. Обрабатывались три цилиндрических заготовки, изготовленные из стали 45, алюминия Д16 и серого чугуна СЧ20 с диаметрами 68, 62 и 63 мм и с длинами 190, 160 и 175 мм соответственно. На заготовках были проточены пять канавок шириной 5 мм, разделяющие их на дорожки для удобства проведения экспериментов и измерения шероховатости. Эксперименты выполнялись на токарно-винторезном станке модели 16К20ВФ1.

При проведении экспериментов использовался метод однофакторного эксперимента, чтобы установить различные зависимости между шероховатостью и режимами резания (скорость резания, подача, глубина резания), вылетом резца и видом обрабатываемого материала. Следует отметить, что при однофакторном эксперименте каждый фактор варьируется, т.е. в каждом опыте варьируют тот фактор, влияние которого необходимо изучать, а все остальные факторы оставляются постоянными, считая, что они не зависят друг от друга и от абсолютной величины их самих [2].

Исходные данные параметров режима резания при проведении экспериментов с однофакторными зависимостями приведены в табл. 1. В табл. 1: N – частота вращения (мин$^{-1}$), t – глубина резания (мм), s – подача (мм/об) и L – вылет резца (мм).

Основным показателем качества поверхности является среднее арифметическое отклонение шероховатости поверхности профиля (Ra), так как оно имеет большое влияние на эксплуатационные свойства поверхности [2]. В данном исследовании шероховатость поверхности обрабатываемых деталей измерялась профилометром модели 130 (рис. 1, б), принцип работы которого основан на сканировании алмазной иглою неровностей измеряемой поверхности в процессе её перемещения вдоль измеряемой поверхности и последующем преобразованием возникающих при этом механических колебаний иглы индуктивным датчиком в измеряемый сигнал. При сборе данных шероховатостей поверхности заготовок четыре измерения были выполнены вдоль оси заготовки под углом 90° для каждого опыта экспериментов и записаны их средние значения шероховатости.

На рис. 1, а рабочая зона станка при использовании металлического резца со сквозными горизонтальными отверстиями при: L = 50 мм; N = 400 мин$^{-1}$; t = 0,05мм и s = 0,05 мм/об.

Результаты исследования и их обсуждение

После проведения экспериментов при помощи профилометра измерялись

шероховатости поверхностей обрабатываемых деталей, значения которых представлены в табл. 2. На основе данных табл. 2 получены зависимости шероховатости от вида конструкции державки режущего инструмента, вида материала обрабатываемой заготовки, частоты вращения шпинделя, подачи, глубины резания и вылета резца. В качестве примера на рис. 2 построены графики зависимости шероховатости поверхности стали от частоты вращения шпинделя, подачи, глубины резания, вылета резца и от вида конструкции державки режущего инструмента.

Таблица 1

Исходные данные при однофакторном эксперименте

Факторы	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
Постоянные факторы	t = 0,05 мм	N = 1000 мин$^{-1}$	N = 1000 мин$^{-1}$	N = 1000 мин$^{-1}$
	s = 0,05 мм/об	s = 0,05 мм/об	t = 0,05 мм	s = 0,05 мм/об
	L = 50 мм	L = 50 мм	L = 50 мм	t = 0,05 мм
Переменные факторы	N_1 = 400 мин$^{-1}$	t_1 = 0,05 мм	s_1 = 0,05 мм/об	L_1 = 41 мм
	N_2 = 500 мин$^{-1}$	t_2 = 0,10 мм	s_2 = 0,06 мм/об	L_2 = 50 мм
	N_3 = 630 мин$^{-1}$	t_3 = 0,15 мм	s_3 = 0,075 мм/об	L_3 = 65 мм
	N_4 = 800 мин$^{-1}$	t_4 = 0,20 мм	s_4 = 0,09 мм/об	–
	N_5 = 1000 мин$^{-1}$	t_5 = 0,25 мм	s_5 = 0,10 мм/об	–

а б

Рис. 1. а – рабочая зона станка с резцом со сквозными горизонтальными отверстиями в державке при точении стали 45:
1 – шпиндель; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – резец; 4 – резцедержатель; б – внешний вид профилометра модели 130 с управляющим компьютером при измерении шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки

По данным табл. 2 видно, что в каждом эксперименте независимо от вида резца шероховатости поверхности алюминия и чугуна имеют наименьшее и наибольшее значения соответственно. Это объясняется хорошей обрабатываемостью алюминия и высокой зернистостью структуры чугуна при точении.

На рис. 2, а, в частности, при точении стали наглядно видно, что при постоянной глубине резания t = 0,05 мм, подаче s = 0,05 мм/об и вылете L = 50 мм с увеличением частоты вращения шпинделя значение шероховатости уменьшается. При увеличении подачи, при постоянной частоте вращения N = 1000 мин$^{-1}$, глубине s = 0,05 мм/об и вылете L = 50 мм шероховатость увеличивается (рис. 2, б). Следует отметить, что такие же характеристики наблюдаются для алюминия и чугуна при изменении частоты вращения и глубины резания. Увеличение глубины резания, при

постоянной частоте вращения $N = 1000$ мин$^{-1}$, подаче $s = 0{,}05$ мм/об и вылете $L = 50$ мм приводит к уменьшению шероховатости поверхности (рис. 2, в). При увеличении вылета, при постоянной частоте вращения $N = 1000$ мин$^{-1}$, подаче $s = 0{,}05$ мм/об и глубине $t = 0{,}05$ мм шероховатость уменьшается (рис. 2, г). Однако при точении алюминия и чугуна увеличение вылета ухудшает шероховатость поверхности. А при использовании резца с отверстиями в державке значение шероховатости увеличивается по сравнению с цельнометаллическим резцом. Это явление объясняется недостаточной жесткостью резца из-за отверстий в державке.

Таблица 2

Значения шероховатости поверхности обработанных деталей

Номер эксперимента		Шероховатость (***Ra***), мкм					
		Цельнометаллический резец			Резец с отверстиями в державке		
		Сталь	Чугун	Алюминий	Сталь	Чугун	Алюминий
1	$N_1 = 400$ мин$^{-1}$	2,81	2,48	0,942	3,1	2,65	1,088
	$N_2 = 500$ мин$^{-1}$	2,432	2,13	0,623	2,57	2,22	1,046
	$N_3 = 630$ мин$^{-1}$	1,77	2,06	0,597	2,186	2,1	0,977
	$N_4 = 800$ мин$^{-1}$	1,07	1,918	0,588	1,181	2,04	0,929
	$N_5 = 1000$ мин$^{-1}$	0,756	1,84	0,57	0,991	2,024	0,867
2	$t_1 = 0{,}05$ мм	0,793	1,717	0,911	0,899	1,884	0,924
	$t_2 = 0{,}1$ мм	0,814	1,739	0,802	0,92	2,001	0,81
	$t_3 = 0{,}15$ мм	0,683	1,725	0,732	0,777	1,949	0,734
	$t_4 = 0{,}2$ мм	0,615	1,558	0,729	0,757	1,84	0,73
	$t_5 = 0{,}25$ мм	0,764	1,574	0,696	0,942	1,782	0,699
3	$S_1 = 0{,}05$ мм/об	0,88	1,75	0,85	1,021	1,8	0,88
	$S_2 = 0{,}06$ мм/об	0,9	1,78	0,88	1,058	1,88	0,985
	$S_3 = 0{,}075$ мм/об	0,95	1,87	0,895	1,21	1,93	1,044
	$S_4 = 0{,}09$ мм/об	0,972	1,9	0,9	1,295	1,96	1,064
	$S_5 = 0{,}1$ мм/об	1,08	1,926	0,93	1,343	1,98	1,1
4	$L_1 = 41$ мм	1,139	1,81	0,791	0,936	1,744	0,792
	$L_2 = 50$ мм	0,937	1,84	0,79	0,942	1,82	0,744
	$L_3 = 65$ мм	0,881	1,867	0,835	0,888	1,989	0,789

Вывод

В данной статье экспериментально исследовано влияние разных факторов, т.е. частота вращения, глубина резания, подача, вылет и вид резца, в процессе точения деталей из разных материалов на шероховатость обрабатываемой поверхности при помощи метода однофакторного эксперимента.

После проведения экспериментов получены следующие выводы:

- При точении всех материалов (алюминий, сталь и чугун) частота вращения шпинделя и подача имеют большое влияние на шероховатость поверхности. Большая частота вращения ($N = 1000$ мин$^{-1}$) и малая подача ($s = 0{,}05$ мм/об) улучшают шероховатость поверхности.
- При точении алюминия и чугуна увеличение глубины резания при постоянной подаче, частоте вращения и вылете улучшает шероховатость поверхности.
- Увеличение вылета резца ухудшает шероховатость обработки поверхности алюминия и чугуна и улучшает шероховатость поверхности стали. Следует отметить, что влияние вылета резца на шероховатость не очень велико.
- Обрабатываемые поверхности при использовании стандартного резца имеют лучшую шероховатость по сравнению с шероховатостью поверхностей, полученных резцом с отверстиями в державке, причиной чему является более высокая жесткость стандартного резца.

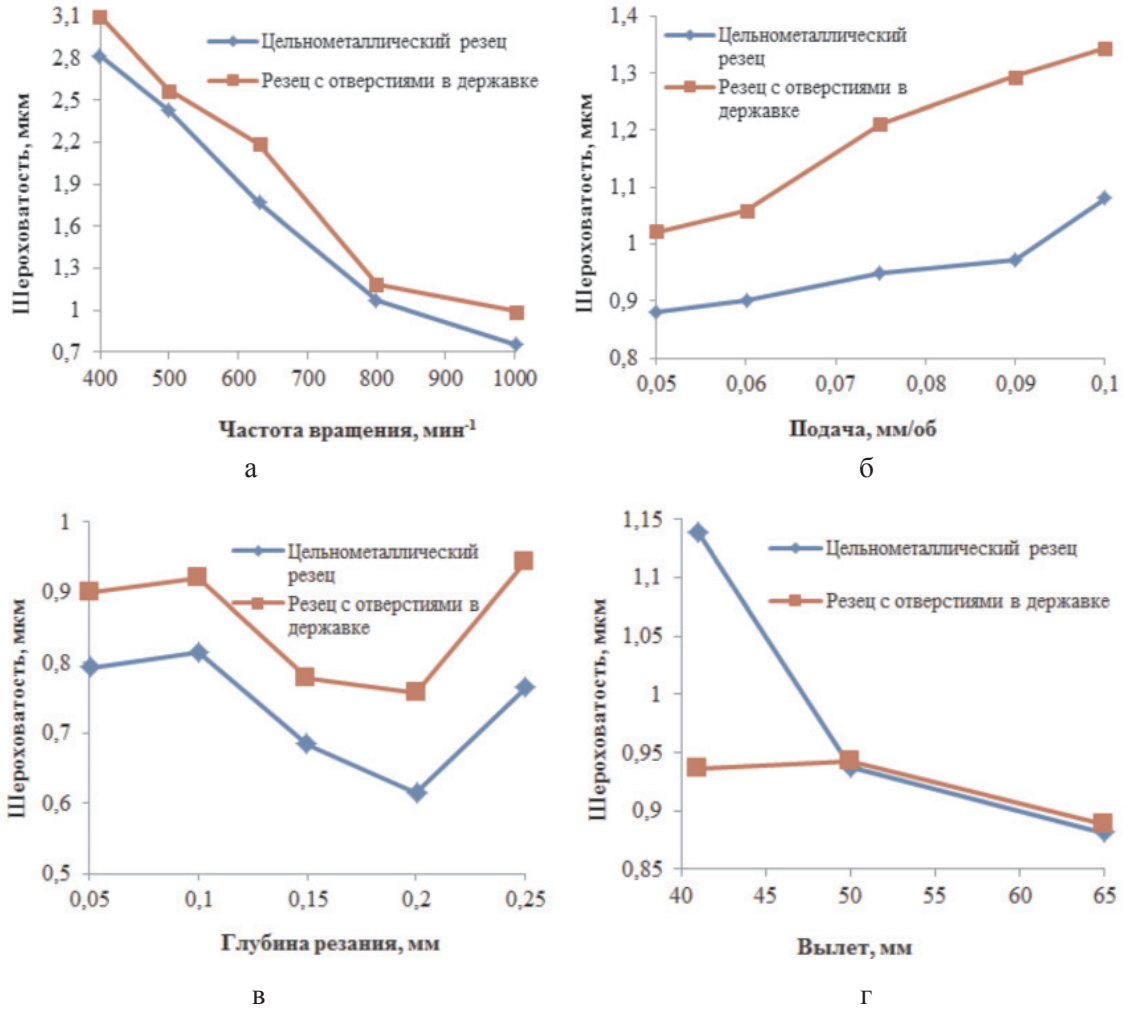

Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности стали от:
а – частоты вращения; б – подачи; в – глубины резания; г – вылета резца

● Из трех исследованных материалов лучше всего обрабатывается алюминий и хуже всего чугун.

Резец с отверстиями в державке имеет большие технологические возможности по сравнению со стандартным. Эксперименты показали, что при больших вылетах жесткость державки недостаточна, но отверстия могут быть заполнены материалом, обладающим высокими демпфирующими характеристиками. Это позволит, с одной стороны, повысить жёсткость державки, а с другой – обеспечить гашение высокочастотных колебаний, возникающих при скоростной чистовой обработке.

После проведения эксперимента также получены режимы резания, при которых обрабатываемые детали имеют наилучшую шероховатость:

1. Для алюминия: частота вращения $N = 1000$ мин$^{-1}$, глубина резания $t = 0{,}05$ мм, подача $S = 0{,}05$ мм/об, вылет $L = 50$ мм при использовании стандартного резца.

2. Для стали: частота вращения $N = 1000$ мин$^{-1}$, глубина резания $t = 0{,}20$ мм, подача $s = 0{,}05$ мм/об, вылет $L = 50$ мм при использовании стандартного резца.

3. Для чугуна: частота вращения $N = 1000$ мин$^{-1}$, глубина резания $t = 0{,}20$ мм, подача $s = 0{,}05$ мм/об, вылет $L = 50$ мм при использовании стандартного резца.

Список литературы:

1. Багдасарян Г.Б., Арутюнян М.Е.. Изучение влияния режимов резания и износа режущего инструмента на шероховатость обработанной поверхности с применением инструмента наименьшего сопротивления // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2007. Т. LX, 2. – С. 223–228.

2. Белов П.С. Повышение качества обработки за счет улучшения конструктивно-технологических параметров резцов: дис. ... канд. тех. наук. – М., 2012. – 182 с.

3. Грановский Г., Грановский В. Резание металлов. – М.: Высш. шк. 1985 – 304 с.

4. Adem Çiçek, Turgay Kıvak and Gürcan Samtaş. Application of Taguchi Method for Surface Roughness and Roundness Error in Drilling of AISI 316 Stainless Steel // Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol 58(3). – P. 165–174.

5. Ali Riza Motorcu. The Optimization of Machining Parameters Using the Taguchi Method for Surface Roughness of AISI 8660 Roughness of AISI 8660 // Journal of Mechanical Engineering. – 2010. – Vol 56(6). – P. 391–401.

6. Chockalingam P., Lee Hong Wee. Surface Roughness and Tool Wear Study on Milling of AISI 304 Stainless Steel Using Different Cooling Conditions // International Journal of Engineering and Technology. – 2012. – Vol.2, № 8. – P. 1386–1391.

7. Janardhan M. and Gopala Krishna A. Multi-objective optimization of cutting parameters for surface roughness and metal removal rate in surface grinding using response surface methodology // International Journal of Advances in Engineering & Technology. – 2012. – Vol. 3, Issue 1. – P. 270–283.

8. Kaladhar M., K. Subbaiah V., Srinivasa Rao Ch. And Narayana Rao K. Application of Taguchi approach and Utility Concept in solving the Multi-objective Problem when turning AISI 202 Austenitic Stainless Steel // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2011. – Vol. 4 (1). – P. 55–61.

9. Mohammed T. Hayajneh, Montasser S. Tahat and Joachim Bluhm. A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2007. – Vol. 1(1). – P. 1–5.

10. Mustafa Gunay, Emre Yucel. Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron // Measurement. – 2013. – Vol. 46. – P. 913–919.

11. Rakesh K. Patel, Prajapati H. R.. Parametric analysis of surface roughness (SR) and material removal rate (MRR) of harden steel on CNC turning using ANOVA analysis: A review // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2012. – Vol. 4, № 07. – P. 3111–3117.

12. Rodrigues L.L.R., Kantharaj A.N., Kantharaj B., Freitas W. R. C. and Murthy B.R.N. Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Cutting Force in Turning Mild Steel // Research Journal of Recent Sciences. – 2012. – Vol. 1(10). – P. 19–26.

13. Safeen Y. Kassab and Younis K. Khoshnaw. The Effect of Cutting Tool Vibration on Surface Roughness of Workpiece in Dry Turning Operation // Eng. & Technology. – 2007. – Vol.25, № 7. – P. 879–889.

14. Sudhansu Ranjan Das, Amaresh Kumar and Debabrata Dhupal. Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts // International Journal of Innovation and Applied Studies. – 2013. – Vol. 2, № 4. – P. 445–453.

15. Thamizhmanii S., Saparudin S., Hasan S. Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 20 Issues 1–2. – P. 503–506.

References

1. Bagdasaryan G.B., Arutyunyan M.E. *Study on the effect of cutting conditions and tool wear on surface roughness using the tool with least resistance. Izv. NAN RA and GIUA. Ser. TN.* 2007. T. LX, 2. pp. 223–228.

2. Belov P.S. *Improving the quality of treatment due to improved structural and technological parameters of cutting tools. Doctoral thesis.* Moscow, 2012. 169 p.

3. Granovskiy G., Granovskiy V. *Metal cutting. Moscow*, 1985, 304 p.

4. Adem Çiçek, Turgay Kıvak and Gürcan Samtaş. *Application of Taguchi Method for Surface Roughness and Roundness Error in Drilling of AISI 316 Stainless Steel. Journal of Mechanical Engineering*. 2012. Vol 58(3). pp. 165–174.

5. Ali Riza Motorcu. The Optimization of Machining *Parameters Using the Taguchi Method for Surface Roughness of AISI 8660 Roughness of AISI 8660. Journal of Mechanical Engineering.* 2010. Vol 56(6). pp. 391–401.

6. Chockalingam P., Lee Hong Wee. *Surface Roughness and Tool Wear Study on Milling of AISI 304 Stainless Steel Using Different Cooling Conditions. International Journal of Engineering and Technology*. 2012 Vol.2, no 8. pp. 1386–1391.

7. Janardhan M. and Gopala Krishna A. *Multi-objective optimization of cutting parameters for surface roughness and metal removal rate in surface grinding using response surface methodology. International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2012. Vol. 3, Issue 1. pp. 270–283.

8. Kaladhar M., K. Subbaiah V., Srinivasa Rao Ch. And Narayana Rao K. *Application of Taguchi approach and Utility Concept in solving the Multi-objective Problem when turning AISI 202 Austenitic Stainless Steel. Journal of Engineering Science and Technology Review.* 2011. Vol. 4 (1). pp. 55–61.

9. Mohammed T. Hayajneh, Montasser S. Tahat and Joachim Bluhm. *A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering.* 2007. Vol. 1(1). pp. 1–5.

10. Mustafa Gunay, Emre Yucel. *Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. Measurement.* 2013. Vol. 46. pp. 913–919.

11. Rakesh K. Patel, Prajapati H. R. *Parametric analysis of surface roughness (SR) and material removal rate (MRR) of harden steel on CNC turning using ANOVA analysis: A review. International Journal of Engineering Science and Technology.* 2012. Vol. 4, no 07. pp. 3111–3117.

12. Rodrigues L.L.R., Kantharaj A.N., Kantharaj B., Freitas W. R. C. and Murthy B.R.N. *Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Cutting Force in Turning Mild Steel // Research Journal of Recent Sciences*. 2012. Vol. 1(10). pp. 19–26.

13. Safeen Y. Kassab and Younis K. Khoshnaw. *The Effect of Cutting Tool Vibration on Surface Roughness of Workpiece in Dry Turning Operation. Eng. & Technology*. 2007. Vol.25,no 7. pp. 879–889.

14. Sudhansu Ranjan Das, Amaresh Kumar and Debabrata Dhupal. *Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts. International Journal of Innovation and Applied Studies.* 2013. Vol. 2, no 4. pp. 445–453.

15. Thamizhmanii S., Saparudin S., Hasan S. *Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2007. Vol. 20 Issues 1-2. pp. 503–506.

Рецензенты:

Расторгуев Г.А., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, РУДН, г. Москва;

Гусаков С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета, РУДН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 16.12.2013.