

УДК 621.9.06

ШЕРОХОВАТОСТЬ И ВОЛНИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ НА ДВУХСУПОРТНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

д-р техн. наук, проф. И.А. КАШТАЛЬЯН; Б. ОРУКАРИ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача повышения производительности двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением путем оптимального совмещения различных технологических переходов. Приведены результаты экспериментальных исследований шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин, обработанных двумя резцами совместно с включением в процесс резания кинематической неустойчивости.

Ключевые слова: поверхности деталей, шероховатость, волнистость, двухсуппортные токарные станки с числовым программным управлением.

Современный этап развития машиностроения характеризуется широким использованием станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако оборудование такого типа достаточно сложное, требующее теоретических знаний и практических навыков, а его приобретение связано с большими финансовыми затратами. В связи с этим проблема эффективного использования станков с ЧПУ является приоритетной для большинства предприятий машиностроения. Для токарных станков с ЧПУ, оснащенных двумя суппортами, резервы повышения эффективности находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Причем число вариантов совмещения может существенно возрасти, если на станке будет реализована функция независимого управления суппортами. В качестве критерия для автоматизированного выбора оптимального варианта совмещения может быть принята продолжительность цикла обработки заготовки, а в качестве ограничений стойкость режущего инструмента и параметры качества (точность размеров и формы обработанной поверхности, ее шероховатость и волнистость). Наибольший интерес при этом представляют математические зависимости (ограничения), устанавливающие взаимосвязь режимов резания с параметрами качества той поверхности детали, которая обработана двумя резцами совместно.

Основная часть. Функционирование станка, оснащенного микропроцессорным устройством ЧПУ, осуществляется путем отработки определенного набора алгоритмов управления. Причем кроме традиционных алгоритмов (интерполяции, расчета эквидистанты, разгона-замедления, коррекции режущего инструмента и др.), в этот набор может быть включен алгоритм независимого управления координатными перемещениями. Такой алгоритм был разработан и реализован на двухсуппортном токарном станке с ЧПУ мод. 1А751Ф3 [1]. По данному алгоритму согласование начала отработки обеих управляющих программ (для правого и левого суппортов) осуществляется с помощью признака синхронизации «Н». В управляющей программе (УП) для правого (левого) суппортов под адресом «Н» задается номер кадра, с которого начинается отработка УП для левого (правого) суппорта. Данная функция управления позволяет обеспечить оптимальное сочетание рабочих и вспомогательных ходов для правого и левого суппортов при их совместной работе.

Наибольший эффект от совместной работы двумя суппортами станка с ЧПУ может быть получен при изготовлении жестких деталей (кроме увеличения производительности обработки значительно повышается точность формы детали в продольном сечении). Эффект повышения точности обработки обеспечивается за счет уравнивания радиальных сил резания P_{y1} и P_{y2} . Настройку резцов для точения двумя резцами осуществляют по одной из известных схем [2]: с делением глубины резания (рис. 1); с делением подачи (рис. 2).

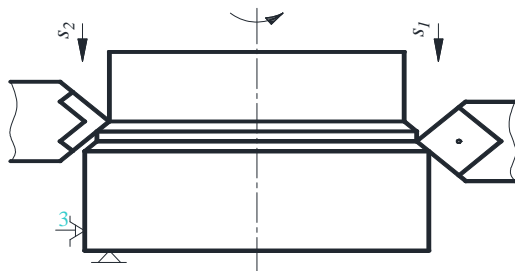


Рисунок 1. – Схема точения с делением глубины резания

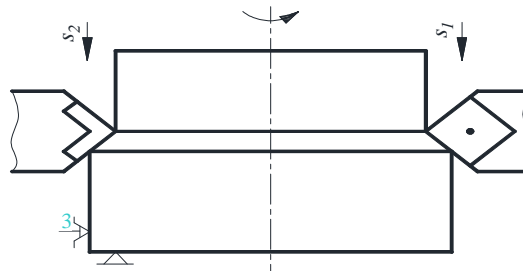


Рисунок 2. – Схема точения с делением подачи

При настройке по первой схеме (с делением глубины резания) требования к точности расположения вершины резца, удаляющего верхний слой припуска по отношению к оси вращения заготовки, невысоки. Фактически точность получаемого при обработке заготовки размера обеспечивается настройкой второго резца. Настроить резцы для точения с делением подачи значительно труднее, поскольку главные режущие кромки резцов должны располагаться на одном конусе, соосном обрабатываемой поверхности, а их вершины должны находиться на одинаковом расстоянии от оси вращения [2].

Представленные схемы точения двумя резцами имеют один общий недостаток, который связан с возникновением вибраций вследствие взаимного влияния реализуемых процессов резания друг на друга, – при совпадении частот вынужденных колебаний одного и другого процессов резания появляются резонансные явления. Для исключения этого недостатка целесообразно для одного из процессов резания обеспечить управляемое закономерное изменение уровня вибраций. Данная задача может быть решена включением в один из процессов резания управляемой кинематической неустойчивости, например, путем модулированного изменения подачи в функции пути. С целью его осуществления был разработан и включен в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ КМ85 модуль, позволяющий периодически увеличивать подачу от S_{\min} до S_{\max} , а затем снижать ее до первоначального значения [3]. Изменение подачи между ее пиковыми значениями при этом производится приращениями величиной ΔS по мере обработки участков Δl между приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимость $S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S$ и зависимость $S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S$, где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} . Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения $l_1 = n_s \Delta l$; значение ΔS выбирается кратным 0,1 мм/мин; Δl принимается кратной единице дискретности.

Поверхность детали, образованная в процессе ее изготовления, всегда имеет неровности в виде выступов и впадин различных величин с небольшими расстояниями между ними. Совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины, представляет собой шероховатость поверхности. Волнистостью поверхности называют совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными выступами или впадинами превышают базовую длину. Обе геометрические характеристики поверхности являются важными показателями технического уровня продукции машиностроения.

На качество поверхности, обработанной резанием, оказывает влияние множество причин, которые объединяют в три основные группы [4]. К первой группе относятся причины, связанные с геометрией процесса резания, – это форма и состояние режущих кромок, а также элементы режимов резания, которые оказывают влияние на траекторию режущих кромок относительно обрабатываемой поверхности. Ко второй группе относятся причины, связанные с упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала. Наконец, третью группу составляют причины, связанные с возникновением вибраций в процессе резания, которые приводят к отклонению действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от траектории заданной. Вибрации, упругие и пластические деформации обрабатываемого материала нарушают закономерное распределение неровностей на поверхности, искажают их форму, существенно увеличивают их высоту.

При совместном точении двумя резцами, установленными на разных суппортах, происходит взаимовлияние реализуемых процессов резания друг на друга, что, естественно, ведет к изменению механизма действия практически всех причин, оказывающих влияние на качество поверхности. Поэтому задача оценки таких показателей качества поверхности, как шероховатость и волнистость, при обработке заготовок на двухсуппортных станках, оснащенных устройством с ЧПУ с функцией независимого управления, является актуальной.

Форму и размеры неровностей, как правило, измеряют в направлении движения резания и в направлении, перпендикулярном этому движению. Высота неровностей поверхности, измеренная в направлении движения резания, характеризует продольную шероховатость поверхности. Поперечная шероховатость измеряется перпендикулярно движению резания (в направлении подачи). Размеры поперечной шероховатости при токарной обработке обычно в два-три раза превышают продольную шероховатость. Вследствие этого оценку шероховатости поверхности при точении обычно производят на основании измерения поперечной шероховатости, которая зависит главным образом от геометрии режущей части инструмента и величины подачи [2].

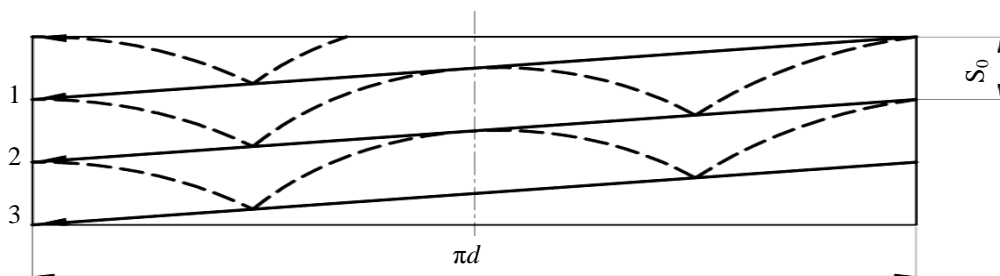
Основная причина образования волнистости – отклонение действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от заданной. Из всего многообразия физических процессов, происходящих в работающей технологической системе, наибольшее влияние на рассогласование траектории движения оказывают вибрации. Колебательные движения режущего инструмента в радиальном направлении, накладываясь на вращательное движение заготовки, приводят к образованию продольной волнистости, измеряемой в направлении движения резания. На характер колебаний, а следовательно,

на волнистость существенное влияние оказывает жесткость технологической системы. Наибольшая волнистость, как правило, образуется при обработке заготовок малой жесткости [2].

При точении с модулированной подачей в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи одного из режущих инструментов, на систему, находящуюся в колебательном движении, колебания гасятся, что должно привести к значительному уменьшению продольной волнистости.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием станка мод. 1А734ФЗ, оснащенного устройством ЧПУ с функцией независимого управления суппортами и функцией модулированной подачи. Обработывалась наружная поверхность втулок из стали 40ХН (длина втулки 145 мм, наружный диаметр 150 мм, внутренний 135 мм) при консольном закреплении в патроне и частоте вращения шпинделя $n_{ш} = 255$ об/мин. Обработка велась резцами с механическим креплением пластины твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части: $\gamma = 8^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $r_6 = 0,8$ мм. В качестве смазывающей охлаждающей жидкости применялась эмульсия НГЛ-205. Обработывались две партии заготовок. Наружная поверхность заготовок первой партии обрабатывалась точением с делением глубины резания. Черновой рабочий ход с глубиной резания $t = 2,5$ мм и скоростью резания $v = 120,9$ м/мин выполнялся резцом, установленным в револьверной головке правого суппорта. Резец, установленный в револьверной головке левого суппорта, выполнял чистовой рабочий ход с глубиной резания $t = 0,5$ мм. Скорость резания при этом составляла 120,1 м/мин. Заготовки первой партии были разбиты на три группы. Точение наружной поверхности заготовок первой группы осуществлялось последовательно (после черновой обработки наружной поверхности втулки резцом, установленным на правом суппорте, включался в работу чистовой резец, установленный на левом суппорте). Наружная поверхность заготовок второй группы обрабатывалась совместно двумя резцами (начало и конец рабочего хода для обоих суппортов синхронизированы). При обработке заготовок третьей группы черновой рабочий ход выполнялся с модулированной подачей, среднее ее значение равнялось подаче, с которой перемещался чистовой резец.

При обработке заготовок второй партии была реализована схема точения с делением подачи (оба рабочих хода выполнялись с глубиной резания $t = 3$ мм и скоростью резания $v = 120,1$ м/мин). Заготовки этой партии были разбиты на две группы. Наружные поверхности втулок первой партии обрабатывались двумя резцами совместно с подачей, которая назначалась из условия обеспечения технологических требований к процессу резания. При обработке наружных поверхностей втулок второй группы резец, установленный в револьверной головке правого суппорта, перемещался с модулированной подачей, среднее значение которой было равно подаче резца, установленного на левом суппорте (рис. 3).



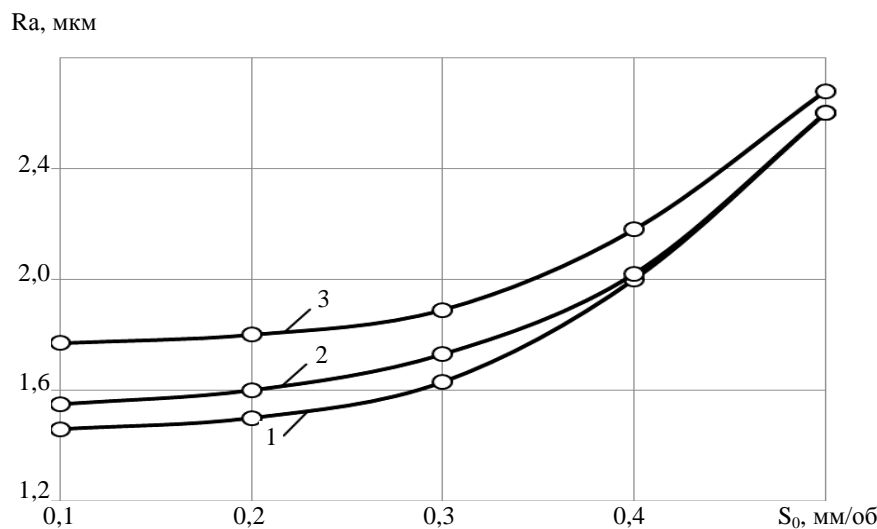
сплошная линия – след вершины резца, работающего с постоянной подачей;
пунктирная линия – с модулированной подачей

Рисунок 3. – Схема следов вершин резцов на развертке наружной поверхности втулки при совместном точении двумя резцами с делением подачи

Запись микронеровностей обработанной поверхности проводилась на профилометре-профилографе мод. 253. Шероховатость поверхности оценивалась по значениям Rz и Ra . Продольная волнистость записывалась на кругломере Tolugond (Англия). Графики строились по средним значениям, полученным в результате обработки тридцати измерений. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних значений измерений производились согласно [5].

Установлено, что при точении двумя резцами совместно с делением глубины резания значения Ra меньше для варианта выполнения чернового рабочего хода с модулированной подачей. Причем эффект уменьшения шероховатости наиболее ярко проявляется при меньших значениях подачи (рис. 4). Данное явление можно объяснить тем, что при обработке двумя резцами одновременно взаимодействуют два нестационарных по своей природе процесса резания, определяемых рядом систематических и случайных факторов. При этом наблюдаются резонансные явления, что приводит к возникновению вибраций и, как следствие, к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Это подтверждается результатами

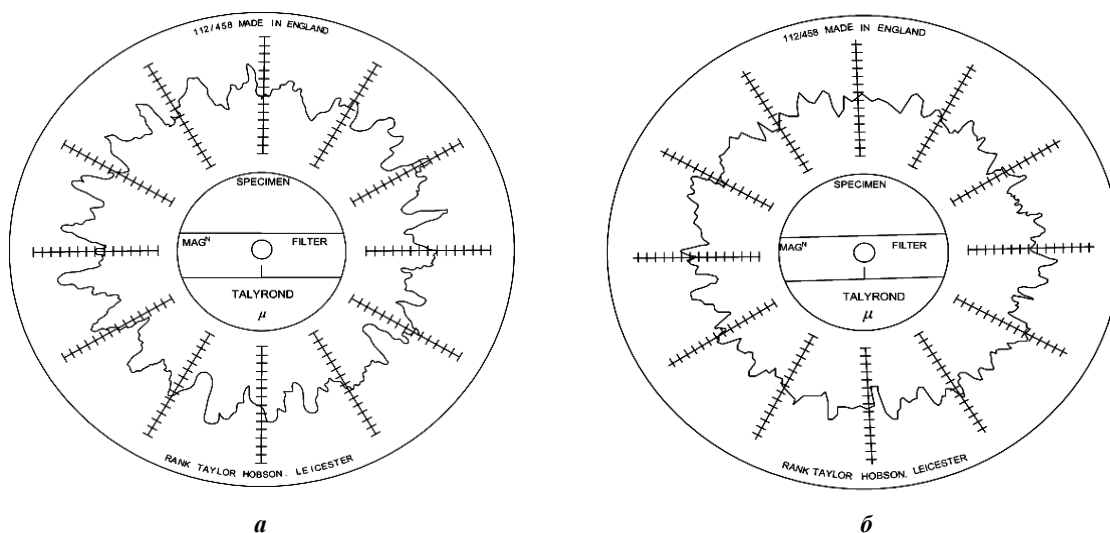
выполненных исследований (шероховатость поверхности, обработанной двумя резцами последовательно, значительно ниже шероховатости поверхности, обработанной двумя резцами совместно). При выполнении чернового рабочего хода с включением в процесс резания кинематической нестабильности в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи, на систему, находящуюся в колебательном движении, колебания гасятся, шероховатость обработанной поверхности при этом уменьшается.



- 1 – оба, черновой и чистовой, рабочие хода выполнены последовательно;
 2 – черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом;
 3 – оба рабочие хода выполнены совместно с постоянной подачей

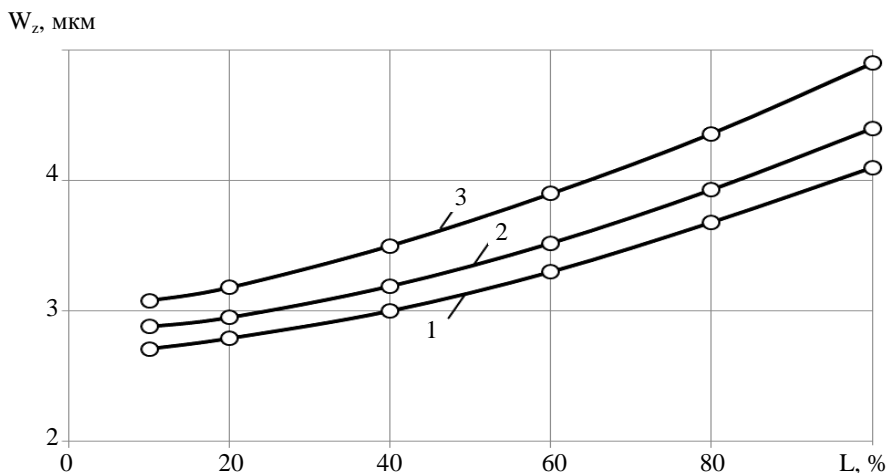
Рисунок 4. – Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra от подачи при точении двумя резцами с делением глубины резания

Анализ ряда волнограмм (рис. 5) показал, что при обработке с модулированной подачей высота продольной волнистости значительно меньше, чем при обработке с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной. Причем эффект уменьшения высоты волнистости изменяется по мере перемещения резца по длине заготовки (по мере изменения жесткости технологической системы). С уменьшением расстояния от точки приложения силы резания до установочной базы заготовки (рис. 6) эффект уменьшения высоты продольной волнистости проявляется в меньшей степени. График построен по средним значениям тридцати замеров.



- а** – черновой рабочий ход выполнен с постоянной подачей; **б** – с модулированной

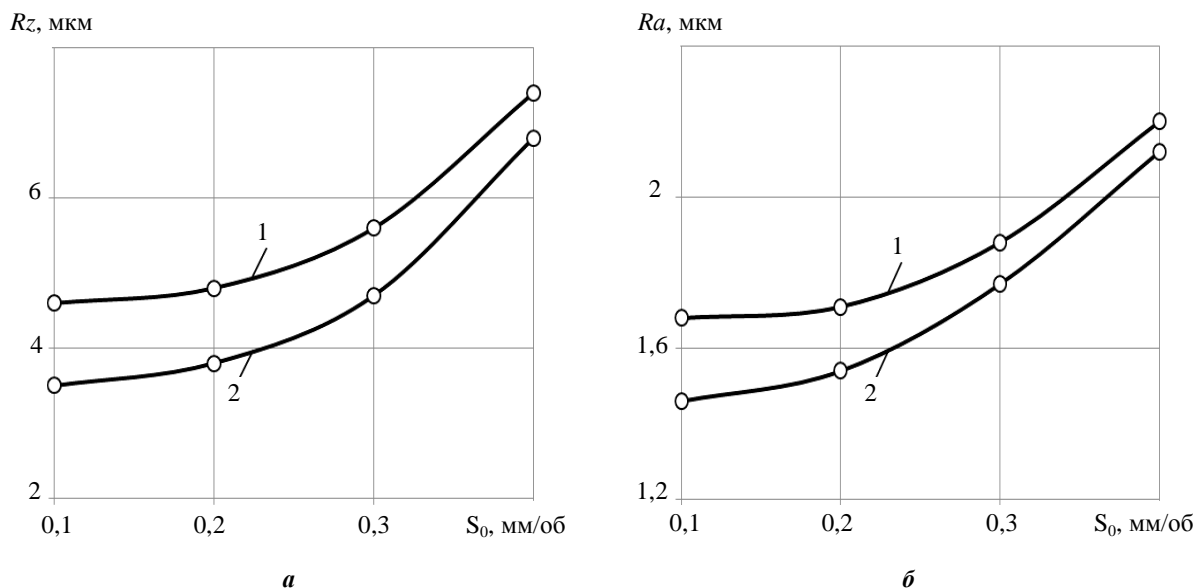
Рисунок 5. – Волнограммы при точении наружных поверхностей втулок двумя резцами с делением глубины резания



- 1 – черновой и чистовой рабочие ходы выполнены последовательно;
- 2 – черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом;
- 3 – оба рабочие хода выполнены с постоянной подачей совместно

Рисунок 6. – Влияние длины консоли на высоту продольной волнистости при точении с делением глубины резания

Экспериментальные исследования процесса точения двумя резцами с делением подачи выполнены при обработке втулок из стали 40ХН (размеры втулок и режимы резания указаны выше). Некоторые частные зависимости параметров шероховатости при точении двумя резцами совместно с делением подачи, полученные классическим методом (методом Гаусса – Зойделя), представлены на рисунке 7.



- 1 – черновой рабочий ход выполнен с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей

Рисунок 7. – Зависимость высоты микронеровностей Rz (а) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (б) от подачи при точении двумя резцами совместно с делением подачи

В результате выполненных экспериментов установлено, что включение в процесс резания одним из резцов модулированной подачи обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности и надежное дробление стружки. Уменьшение шероховатости, как и при точении двумя резцами с делением глубины резания, обусловлено снижением уровня вибраций технологической системы за счет уменьшения вероятности возникновения резонансных явлений при наложении друг на друга однородных процессов резания. Надежное дробление стружки обеспечивается за счет периодического совпадения поверхностей резания обоих резцов.

Влияние параметров подачи на величину среднего арифметического отклонения профиля Ra при включении в процесс резания одним из резцов кинематической нестабильности исследовали по методу полного факторного эксперимента 2^3 . Переменными факторами являлись: подача резца, установленного на левом суппорте S_o , мм/об; коэффициент модулированного изменения подачи резца, установленного на правом суппорте K_m ; длина обработки, соответствующая изменению подачи между ее пиковыми значениями l_1 , мм. Основные характеристики плана экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Факторы, уровни и интервалы варьирования

Уровень	Кодированное значение	Фактор		
		$x_1(S_o, \text{мм/об})$	$x_2(K_m)$	$x_3(l_1, \text{мм})$
Интервалы варьирования:		0,15	0,2	0,4
- основной	0	0,25	0,6	0,8
- верхний	+1	0,4	0,8	1,2
- нижний	-1	0,1	0,4	0,4

Подача левого суппорта S_o определяет производительность обработки при совместной работе двумя суппортами и принимается не менее половины расчетной подачи, которая назначается из условия обеспечения технологических требований к процессу резания.

Коэффициент K_m равен отношению нижнего пикового значения подачи к ее верхнему пиковому значению. Фактически нижний и верхний уровни K_m определяют пиковые значения модулированной подачи на обороты $S_{o_{min}}$ и $S_{o_{max}}$, которые назначаются из условия, что их средняя сумма должна быть равна подаче на оборот S_o резца, работающего с постоянной подачей.

Длина обработки l_1 , на которой происходит изменение подачи между ее пиковыми значениями (длина пути разгона – замедления), определяет частоту модуляции подачи. По данным [6], эффект от метода обработки с модулированной подачей может быть получен при частоте модуляции около 2,75 Гц. Величина l_1 для указанной частоты модуляции может изменяться в пределах от 0,4 до 1,2 мм.

Матрица планирования и результаты полного факторного эксперимента приведены в таблице 2. Эксперимент проведен с учетом рандомизации опытов. Все расчеты, необходимые для определения величины среднеквадратической ошибки опыта и значимости коэффициентов, выполнены согласно [5].

Коэффициенты регрессии равны: $b_0 = 1,712$; $b_1 = 0,337$; $b_2 = -0,050$; $b_3 = 0,012$; $b_{1,2} = 0,000125$; $b_{1,3} = -0,0125$; $b_{2,3} = -0,015$; $b_{1,2,3} = -0,015$.

С учетом значимости коэффициентов регрессии математическая модель имеет вид

$$y = 1,71 + 0,34x_1 - 0,05x_2 + 0,012x_3. \quad (1)$$

Таблица 2. – Матрица планирования и результаты опыта

x_0	x_1	x_2	x_3	y_{i1}	y_{i2}	y_i
				мкм		
+1	-1	-1	+1	1,49	1,43	1,55
+1	+1	-1	+1	2,14	2,10	2,12
+1	-1	+1	+1	1,31	1,37	1,34
+1	+1	+1	+1	2,02	1,94	1,98
+1	-1	-1	-1	1,39	1,43	1,41
+1	+1	-1	-1	2,03	2,09	2,06
+1	-1	+1	-1	1,32	1,26	1,29
+1	+1	+1	-1	2,01	2,07	2,04

Адекватность уравнения проверена и подтверждена по критерию Фишера. В уравнении (1) факторы представлены в кодовых значениях.

Пользуясь зависимостями:

$$x_1 = \frac{S_o - 0,15}{0,15}, \quad x_2 = \frac{K_m - 0,6}{0,2}, \quad x_3 = \frac{l_1 - 0,8}{0,4},$$

получим уравнение (1) в натуральных величинах:

$$Ra = 1,27 + 2,26S_o - 0,25K_m + 0,03l_1. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для значений S_o , K_m , l_1 в выбранных пределах варьирования.

Анализ полученной математической модели (2) показывает, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает значение подачи S_o , с которой перемещается левый суппорт (с ее увеличением шероховатость возрастает). Меньше влияет на величину микронеровностей коэффициент K_m модулированного изменения подачи резца, установленного на правом суппорте. При его уменьшении шероховатость обработанной поверхности увеличивается.

Заключение. Включение в состав технологического программного обеспечения микропроцессорных устройств ЧПУ программного модуля, реализующего алгоритм модулированного изменения подачи, расширяет функциональные возможности технологического оборудования. Для токарных станков с независимым управлением суппортами это выражается в возможности создания схем совмещения, обеспечивающих повышение производительности обработки при изготовлении нежестких деталей.

Вследствие повышения устойчивости технологической системы к автоколебаниям в процессе точения двумя резцами (совместно) с делением глубины резания и сообщением черновому резцу модулированной подачи уменьшается шероховатость и продольная волнистость обработанной поверхности. Наибольшее влияние на шероховатость поверхности, обработанной двумя резцами с делением подачи, оказывает подача S_o резца, совершающего равномерное движение (с увеличением S_o наблюдается рост значений Ra). Длина пути разгона (замедления) l_1 в интервале от 0,4 до 1,2 мм на шероховатость обработанной поверхности влияет незначительно и может назначаться только из условия повышения уровня виброустойчивости технологической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каштальян, И.А. Программная реализация функции независимого управления координатными перемещениями / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Автоматизация и роботизация процессов и производств : материалы науч.-практ. семинара, Минск, 13 февр. 2014 г. ; редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 33–35.
2. Махаринский, Е.И. Основы технологии машиностроения : учебник / Е.И. Махаринский, В.А. Горохов. – Минск : Выш. школа, 1997. – 423 с.
3. Каштальян, И.А. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 115–126.
4. Маталин, А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – Киев : Техника, 1971. – 144 с.
5. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М.Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
6. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1978. – 304 с.

Поступила 22.12.2016

ROUGHNESS AND WAVINESS OF SURFACE SURFACES PROCESSED ON TWO SUPPORT LATHES WITH NUMERICAL SOFTWARE CONTROL

I. KASYTALYAN, B. ORUKARI

The problem of increasing the productivity of two support lathes with numerical program control by optimal combination of various technological transitions is considered. The results of experimental studies of the roughness and undulation of the surfaces of machine parts treated with two incisors together with the inclusion of kinematic instability in the cutting process are presented.

Keywords: *surfaces of parts, roughness, waviness, two support lathes with numerical program software control.*