

3. Восстановление штоков (наплавка, шлифовка, хромирование и полировка) // Электронный ресурс: <http://www.сваебой-строймаш.рф/index.php/uslugi> Дата доступа 07.04.2016 г.
4. Демин А.А. Особенности электроосаждения хрома и его сплавов из серноокислых электролитов. Тез. докл. 7 Всесоюзная конференция по электрохимии, Москва, 1988, Т.1, с.359.
5. Шлугер М.А. Износостойкие гальванические покрытия, Ж. Всес. хим. общества, 1980, Т.25, №2, с.138-141.
6. Беленький М. А., Иванов А. Ф. Электроосаждение металлических покрытий. Справочник. – М.: Металлургия. – 1985. – 351 с.
7. Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Зольников В.Г. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. - №1. – С. 67-72.
8. Тимошкин С.И. Гидроцилиндры – причины выхода из строя и требования к монтажу / Главный механик. – 2009. – № 2. – С. 23–27.

УДК 621.941.1

Шелег В.К., Данильчик С.С.

## ТОЧНОСТЬ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ 45 С АСИММЕТРИЧНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ИНСТРУМЕНТА

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Исследован процесс обработки стали 45 точением с наложением на подачу инструмента колебаний с асимметричным циклом. Определены условия устойчивого стружкодробления. Установлено влияние коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента на шероховатость обработанных поверхностей. Получены математические зависимости шероховатости обработанных поверхностей от режимов резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента. Снижению шероховатости поверхности способствует уменьшение коэффициента асимметрии цикла колебаний.*

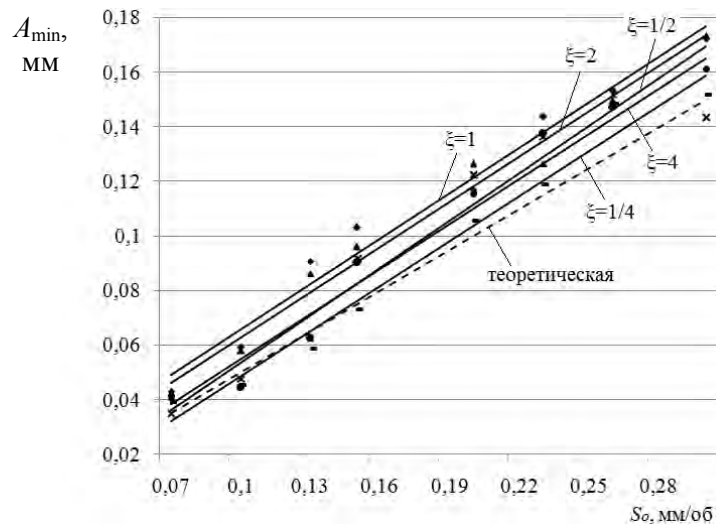
Токарная обработка конструкционных углеродистых и легированных сталей, имеющих высокую вязкость, сопровождается образованием сливной стружки, которая наматывается на инструмент и обрабатываемую заготовку, что затрудняет ее удаление из зоны резания, является источником травматизма рабочих. Сливная стружка имеет большой объем и требует увеличения затрат на ее складирование и транспортировку. В связи с этим к числу наиболее острых проблем, возникающих при организации процесса резания конструкционных углеродистых и легированных сталей на токарном оборудовании, относится проблема управления размерами стружки. Для обеспечения стружкодробления нами предложен метод точения с асимметричными колебаниями инструмента [1].

Процесс стружкодробления рассмотрен на примере стали 45, так как она широко применяется в машиностроительном производстве и является эталонной, в сравнении с которой оценивается обрабатываемость резанием других сталей. Исследования проводились на токарно-винторезном станке модели 16К20 при наружном продольном точении резцом с механическим креплением квадратных неперетачиваемых пластин SNUM-120408T15K6 ГОСТ 19052-80. При установке пластины в корпус резца были обеспечены углы в плане  $\varphi=45^\circ$  и  $\varphi_1=45^\circ$ , передний угол  $\gamma=15^\circ$  и задний угол  $\alpha=15^\circ$ , угол наклона главной режущей кромки  $\lambda=7^\circ$ . Радиус при вершине составлял 0,8 мм. Размеры державки резца 20x20 мм.

Наряду с обеспечением устойчивого стружкодробления важно получить требуемые точность и шероховатость обработанных поверхностей. С этой целью были приняты режимы резания, соответствующие рекомендуемым для полустойковой и чистой обработки: глубина резания 1–3 мм, подача 0,075–0,3 мм/об и скорость резания 40–180 м/мин. Предварительными исследованиями установлено, что в данных пределах режимов резания при точении без колебаний инструмента образуется сливная стружка. Для обеспечения стружкодробления на подачу

инструмента накладывались дополнительные колебания, направленные вдоль оси шпинделя станка, с коэффициентами асимметрии цикла колебаний  $\xi=1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3$  и  $4$  [1].

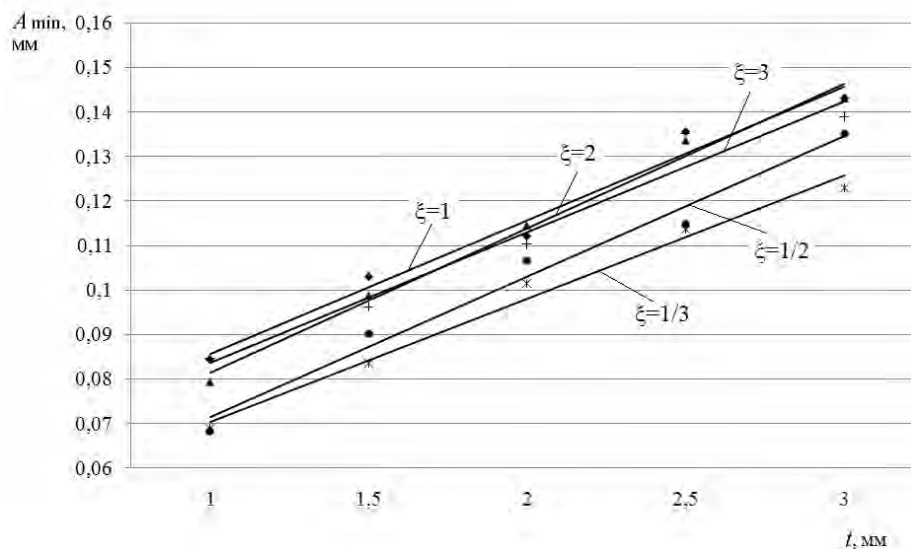
Зависимость минимальной амплитуды колебаний инструмента, необходимой для устойчивого стружкодробления, от подачи представлена на рисунке 1. Теоретическая зависимость минимальной амплитуды от подачи ( $A_{\min}=S_o/2$ ) изображена штриховой линией. Графики зависимости говорят о том, что величина действительной минимальной амплитуды выше теоретической на 5-50%, что связано с действием сил резания на инструмент, резцедержатель и элементы суппортной группы станка, вызывая их упругие деформации. Эти деформации требуют для стабильного дробления стружки увеличения амплитуды колебаний инструмента. Дробление стружки происходило и на меньших амплитудах колебаний инструмента, но оно было неустойчивым.



$v=70$  м/мин,  $t=1,5$  мм

Рис. 1. Графики зависимости минимальной амплитуды колебаний от подачи

Минимальная амплитуда колебаний увеличивается также с увеличением глубины резания (рисунок 2). С ростом глубины резания увеличивается площадь сечения срезаемого слоя, которая имеет прямую связь с силами резания.



$v=70$  м/мин,  $S_o=0,15$  мм/об

Рис. 2. Графики зависимости минимальной амплитуды колебаний от глубины резания

Такая же зависимость существует между силами резания и упругими деформациями технологической системы, которые требуют корректировки величины минимальной амплитуды колебаний в сторону увеличения.

Влияние скорости резания на минимальную амплитуду при точении с асимметричными колебаниями незначительно. Из графиков (рисунок 3) видно, что минимальная амплитуда с ростом скорости резания уменьшается. Как известно, увеличение скорости резания ведет к росту температуры в зоне резания. При этом влияние температуры на минимальную амплитуду колебаний может быть рассмотрено с двух сторон [2]. С одной стороны повышение температуры способствует размягчению тонкого слоя стружки. При этом уменьшается трение между стружкой и резцом, а, значит, и сила резания, что приводит к уменьшению упругих деформаций технологической системы и, следовательно, к уменьшению амплитуды колебаний. С другой стороны повышение температуры приводит к увеличению пластической вязкости обрабатываемого материала и для разделения стружки на элементы необходимо увеличение амплитуды колебаний инструмента.

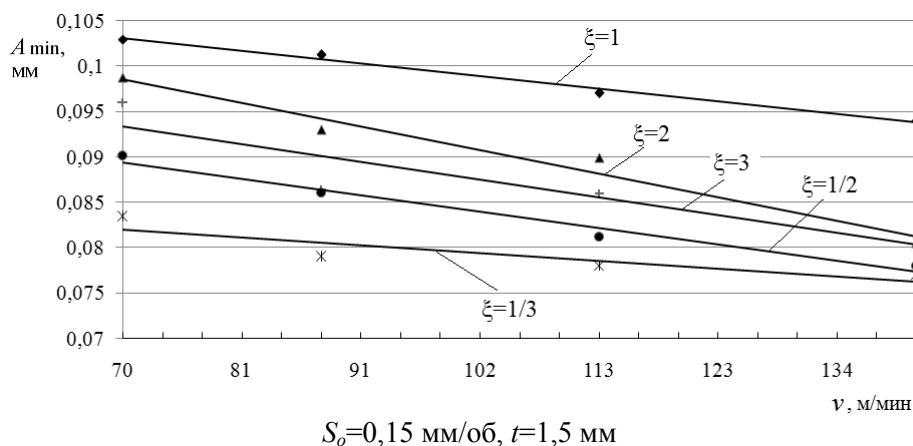
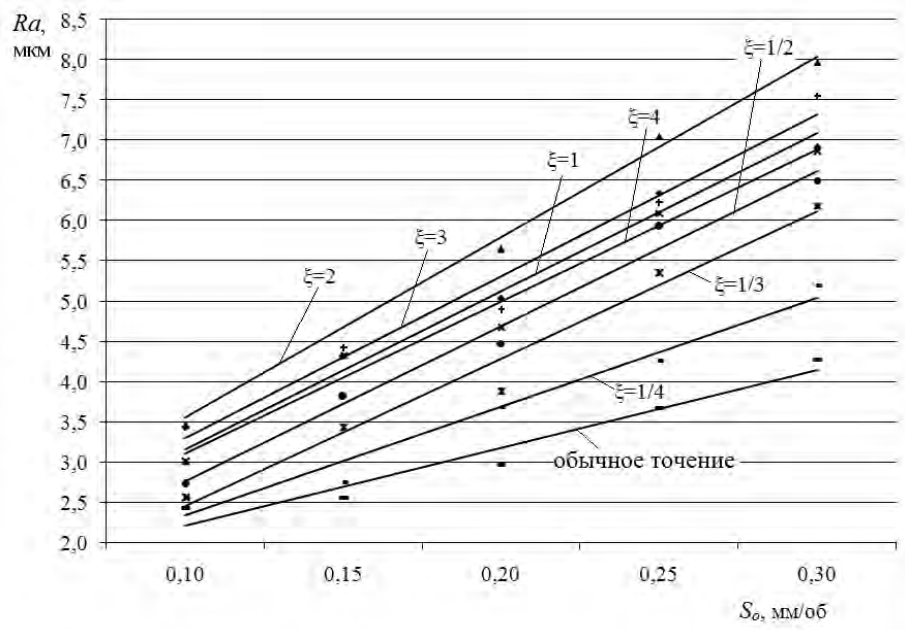


Рис. 3. Графики зависимости минимальной амплитуды от скорости резания при точении стали 45

Результаты исследования шероховатости обработанной поверхности сравнивались с данными вибрационного точения с симметричным циклом колебаний ( $\xi=1$ ) и обычного точения. На рисунке 4 представлен график зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от подачи. При этом обработка производилась на минимальной для каждой из подач амплитуде колебаний инструмента. Увеличение шероховатости поверхности при точении с колебаниями инструмента обусловлено ростом максимальной высоты гребешков, что связано с периодическим увеличением расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки. В сравнении с обычным точением шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, может быть значительно выше и зависит от коэффициента асимметрии цикла колебаний. К примеру, параметр шероховатости поверхности  $Ra$  после точения с коэффициентами асимметрии цикла колебаний 1/4 и 4 выше, чем после обычного точения на 10-20% и на 45-60%, соответственно. Но точение с коэффициентом асимметрии цикла колебаний  $\xi < 1$  позволяет уменьшить шероховатость по отношению к вибрационному точению с  $\xi=1$ . Так, при точении с коэффициентом 1/4 среднее арифметическое отклонение профиля при рассматриваемых режимах резания уменьшается на 25-30%. При определенных режимах резания точение с коэффициентами  $\xi < 1$  позволяет получать шероховатость поверхности, соответствующую чистовой обработке ( $Ra= 2,5-3,2$  мкм).

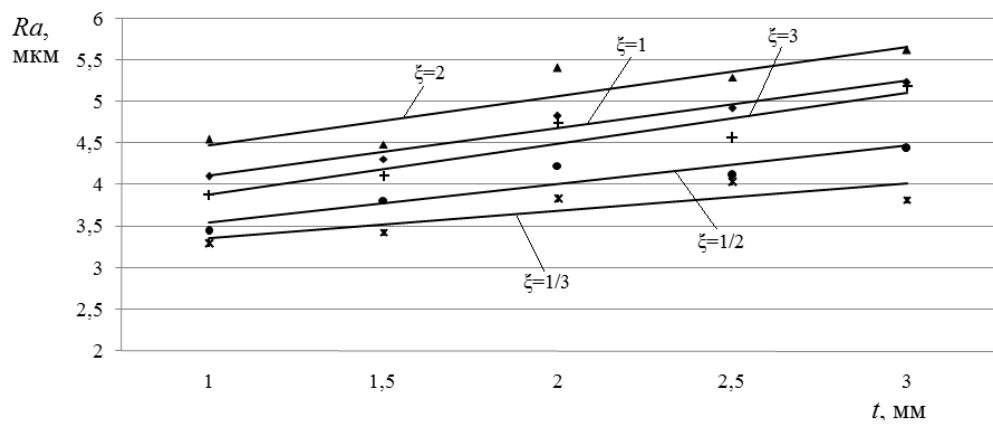
Как видно из графиков, увеличение глубины резания приводит к росту шероховатости обработанной поверхности. Увеличение глубины резания, сопровождающееся ростом ширины срезаемого слоя, в совокупности с периодическим ростом толщины среза приводит к соответствующим периодическим изменениям сил резания. Большой размах сил резания влечет за собой периодические упругие деформации технологической системы, которые приводят к снижению качества обработанных поверхностей.

На рисунках 5 и 6 показана зависимость шероховатости поверхности от глубины и скорости резания.



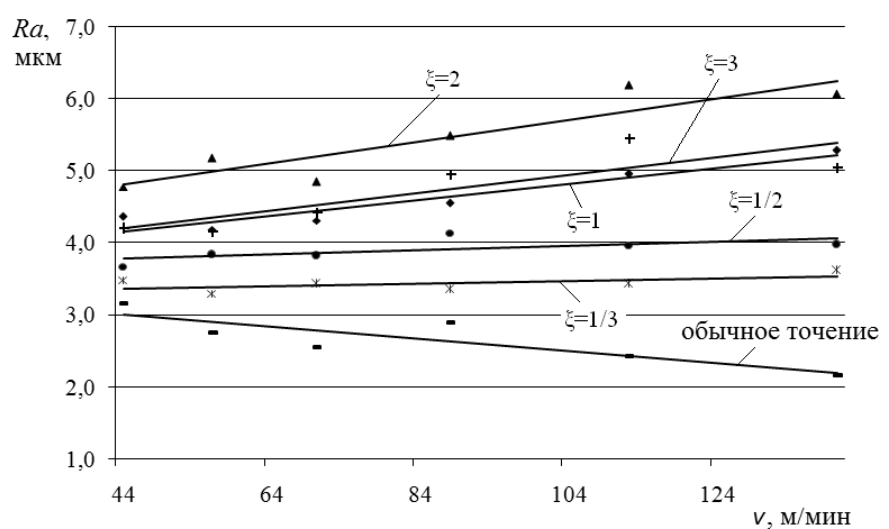
$v=70$  м/мин,  $t=1,5$  мм

Рис. 4. Графики зависимости шероховатости от подачи



$v=70$  м/мин,  $S_o=0,15$  мм/об

Рис. 5. Графики зависимости шероховатости от глубины резания



$S_o=0,15$  мм/об,  $t=1,5$  мм

Рис. 6. Графики зависимости шероховатости от скорости резания

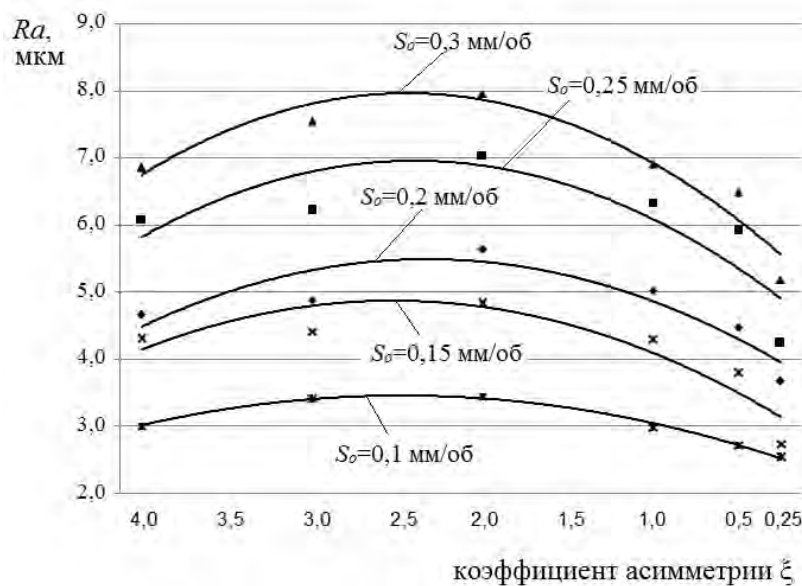
Влияние скорости резания при обычном точении на процесс резания заключается в том, что с ее увеличением растет температура и уменьшается трение между резцом и обрабатываемым металлом. При этом условия наростообразования ухудшаются и шероховатость поверхности уменьшается. При точении с вибрациями условия для наростообразования отсутствуют, поэтому увеличение скорости резания на шероховатость поверхности влияния не оказывает. Но при обработке образцов одного диаметра увеличение скорости резания требует увеличения частоты вращения шпинделя и, следовательно, частоты колебаний инструмента. При этом возрастает влияние сил инерции на траекторию внутрициклового движения инструмента, которое заключается в ее искажении в конце прямого и обратного хода в течение цикла колебаний. Траектория движения инструмента отклоняется от теоретической и при этом увеличивается максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки. Так можно объяснить увеличение шероховатости обработанных поверхностей с ростом скорости резания.

Оценка регрессионных моделей зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от режимов резания, полученных в результате экспериментальных исследований, позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает подача. Наименее значимым фактором является скорость резания. Взаимодействие факторов не оказывает значимого влияния на величину шероховатости.

Зависимость шероховатости поверхности от коэффициента асимметрии цикла колебаний носит нелинейный характер (рисунок 7). Графики зависимости могут быть аппроксимированы квадратической функцией. Используя методику расчета, приведенную в [3], можно получить уравнения зависимости шероховатости от коэффициента асимметрии цикла колебаний. Так, для подачи  $S_o=0,15$  мм/об уравнение имеет вид

$$Ra = 2,9194 + 1,2882 \xi - 0,2528 \xi^2. \quad (1)$$

Анализ данного уравнения позволяет сделать заключение о том, что шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, может быть уменьшена по сравнению с шероховатостью поверхности, полученной после симметричного вибрационного точения ( $\xi=1$ ). Уменьшение шероховатости обусловлено, в первую очередь, уменьшением расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки и, следовательно, максимальной толщины среза. Установлено также, что шероховатость поверхности ниже при точении с коэффициентом асимметрии меньше единицы, чем при точении с обратными по значению коэффициентами асимметрии.

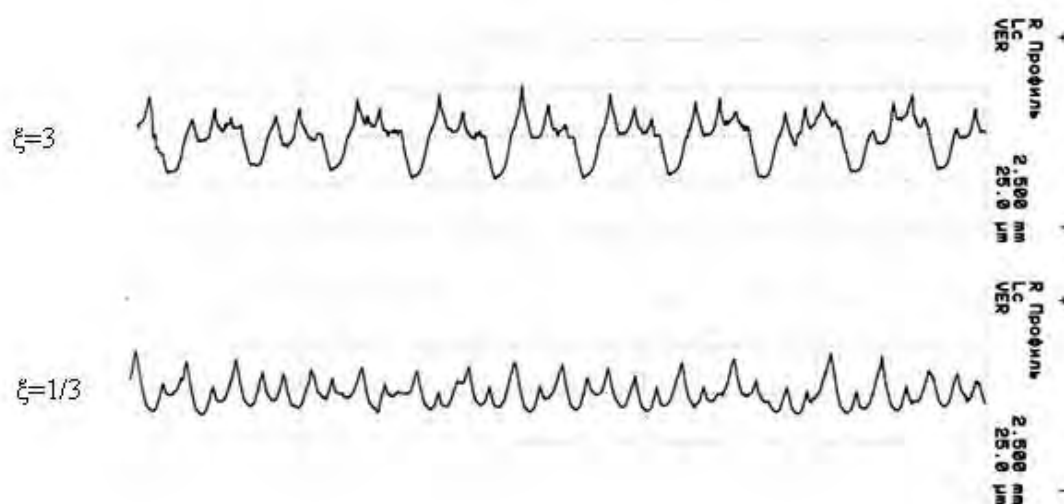


$v=70$  м/мин,  $t=1,5$  мм

Рис. 7. Графики зависимости шероховатости от коэффициента асимметрии цикла

Эти результаты эксперимента обусловлены разницей в кинематике процесса обработки, а именно, изменением кинематических углов инструмента. Передний кинематический угол реза при точении с  $\xi < 1$  больше, чем при точении с  $\xi > 1$ . Изменение заднего кинематического угла имеет обратный характер. С увеличением переднего угла максимальная высота микронеровности обработанной поверхности уменьшается за счет уменьшения упругой и пластической деформации поверхностного слоя обрабатываемой детали. Уменьшение же заднего угла приводит к увеличению высоты микронеровности в связи с увеличением контакта задней поверхности с обработанной поверхностью, но это влияние на шероховатость поверхности незначительно [4].

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает жесткость технологической системы. Силы, возникающие в процессе точения, приводят к упругому отжиму инструмента от заготовки. В связи с тем, что силы резания и, в частности, радиальная составляющая силы  $P_y$ , имеют нестабильный характер, упругие деформации технологической системы также периодически изменяются. Увеличивающаяся сила резания стремится отжать заготовку от инструмента. В момент, когда сила резания приближается к минимальным значениям, упругие деформации уменьшаются, и происходит врезание резца в заготовку в радиальном направлении и увеличение глубины впадины. При этом глубина впадин больше при точении с  $\xi > 1$ , чем при точении с  $\xi < 1$ , о чем свидетельствуют полученные профилограммы (рисунок 8). Это обусловлено тем, что промежутки времени, отведенные на уменьшение толщины среза от максимального значения до нуля, при точении с  $\xi = 2 \dots 4$  больше в 1,25–1,5 раз, чем при  $\xi = 1/2 \dots 1/4$ , что приводит к более значительному уменьшению упругих деформаций и, соответственно, к образованию более глубоких впадин. При этом увеличивается максимальная высота микронеровности  $R_{max}$ .



$v=70$  м/мин,  $S_o=0,3$  мм/об,  $t=1,5$  мм

Рис. 8. Профилограммы поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента

Погрешности обработки, составляющие обычно наиболее значимую часть суммарной погрешности обработки, обусловлены целым рядом технологических факторов, основными из которых являются геометрические неточности, упругие и тепловые деформации звеньев технологической системы, упругие деформации материала детали под действием усилий закрепления, размерный износ режущего инструмента и внутренние напряжения в обрабатываемой детали. Эти погрешности могут иметь место как при обычной обработке, так и при обработке с колебаниями инструмента. На точность обработки при точении с асимметричными колебаниями инструмента могут влиять также факторы, связанные с самим вибрационным процессом. Оценку их влияния на точность обработки проведем по результатам контроля точности диаметральных размеров, отклонения от круглости и профиля продольного сечения [5].

Для оценки точности размеров и формы поверхностей была обработана партия деталей количеством 100 штук диаметром 35 мм и длиной 100 мм. Детали были обработаны на следующих режимах резания: подача 0,15 мм/об, глубина резания 1,5 мм и скорость резания 70 м/мин. Образцы обтачивались на длину 50 мм. Обработка проводилась точением с коэффициентом асимметрии цикла колебаний  $\xi=1/3$ . Одной из характеристик эмпирического распределения является среднее квадратическое отклонение. Получены следующие данные:

- среднее квадратическое отклонение размеров – 0,0103 мм,
- среднее квадратическое отклонение от круглости – 0,002 мм,
- среднее квадратическое отклонение профиля продольного сечения – 0,0015 мм.

Среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности формы не превышает величину среднего квадратического отклонения погрешностей размера ( $\sigma=0,0103$  мм). Поэтому влиянием погрешности формы на точность обработки можно пренебречь и теоретическое поле рассеивания погрешности обработки составит [6]

$$\omega_T = 6\sigma = 0,062 \text{ мм}, \quad (2)$$

что соответствует 9-му качеству точности.

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований влияния амплитуды колебаний инструмента на процесс стружкодробления установлено, что для конкретных условий обработки (режимы резания и коэффициент асимметрии цикла колебаний) существует минимальная амплитуда колебаний, обеспечивающая устойчивое стружкодробление. Зависимость минимальной амплитуды от режимов резания и более высокие ее значения в сравнении с теоретической минимальной амплитудой, равной половине подачи на оборот, связаны с упругими деформациями технологической системы. Обработка с амплитудой колебаний большей, чем минимальная, не влияет на процесс стружкодробления.

После точения с коэффициентами асимметрии цикла колебаний инструмента меньше единицы шероховатость обработанной поверхности ниже, чем после точения с обратными им коэффициентами асимметрии на 15–25%. При этом она может быть снижена по сравнению с шероховатостью после вибрационного точения ( $\xi=1$ ), что является преимуществом точения с асимметричными колебаниями инструмента перед данным методом стружкодробления. Так, при точении с коэффициентом асимметрии цикла колебаний инструмента  $\xi=1/4$  параметр шероховатости  $Ra$  снижается на 25–30%.

При достаточной жесткости системы СПИД точность обработки точением с асимметричными колебаниями инструмента может достигать 9–10 квалитетов, что соответствует получистовой и чистовой обработке на токарных станках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данильчик, С.С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С.С. Данильчик, В.К. Шелег // Наука и техника. 2013. – №4. – С. 16–21.
2. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
3. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
4. Кожевников, Д.В. Резание материалов: учеб. для вузов / Д.В. Кожевников. – М.: Машиностроение, 2007. – 472 с.
5. Шелег, В.К. Влияние параметров точения с асимметричными колебаниями инструмента на точность обработки / В.К. Шелег, С.С. Данильчик // Технология – оборудование – инструмент – качество: тезисы докл. междунауч.-техн. конф (Минск, 9–10 апреля 2014 г.) / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. Минск: Бизнесофсет, 2014. – С. 125–127.
6. Кораблев, П.А. Пути повышения точности обработки на металлорежущих станках в приборостроении / П.А. Кораблев. – М.: Машиностроение, 1974. – 120 с.