

**МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.941.1

**ТОЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
С НАЛОЖЕНИЕМ НА ПОДАЧУ ИНСТРУМЕНТА АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ****д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ, С.С. ДАНИЛЬЧИК  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

*Рассматривается процесс точения конструкционных сталей с наложением на подачу инструмента асимметричных колебаний. В ходе исследования выявлено, что минимальная амплитуда колебаний инструмента, достаточная для стружкодробления, увеличивается с ростом подачи и глубины резания. Получены графические и математические зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи, глубины резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний, которые позволили установить ряд новых закономерностей.*

Точение с наложением на подачу инструмента дополнительных направленных колебаний с асимметричным циклом предназначено для обработки деталей с образованием дробленой стружки. Негармонические колебания, сообщаемые инструменту, характеризуются различными временными промежутками движения резца в течение цикла в направлении подачи и обратном направлении, т.е. коэффициентом асимметрии  $\xi$  цикла колебаний [1]. Каждому коэффициенту асимметрии соответствует определенная частота колебаний  $f$ , обеспечивающая устойчивое дробление стружки при минимальной амплитуде колебательных движений. Отношение частоты колебаний  $f$  к частоте вращения заготовки  $n$  можно определить по формуле

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1},$$

где  $z$  – число полных колебаний за один оборот заготовки.

Обработка деталей с минимальной, достаточной для устойчивого дробления стружки, амплитудой колебаний позволяет уменьшить негативное влияние колебательного движения инструмента на точность и качество обработанных поверхностей [2].

Целью данной работы является определение зависимости минимальной амплитуды колебаний от режимов резания и влияния режимов резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний на шероховатость и точность обработанных поверхностей.

Для исследования применялось гидромеханическое устройство, позволяющее устанавливать коэффициент асимметрии цикла колебаний сменными кулачками, а амплитуду регулировать дросселем. Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45, так как она имеет широкое применение в машиностроительном производстве и является эталонной; в сравнении с ней оценивается обрабатываемость резанием других сталей. Приняты пределы режимов резания, на которых при традиционной обработке резцом из твердого сплава Т15К6 сходит сливная стружка. Так, глубина резания принята в пределах  $t = 1 \dots 3$  мм, подача  $S_0 = 0,075 \dots 0,3$  мм/об, скорость резания  $V = 70 \dots 141$  м/мин. Обрабатывались образцы диаметром 45 и длиной 300 мм. Крепление образцов на токарном станке выполнялось в трехкулачковом патроне с поджатием центром пиноли задней бабки. Обработка велась резцом, оснащенным неперетачиваемой многогранной пластиной и имеющим следующие геометрические параметры: углы в плане  $\phi = 45^\circ$  и  $\phi_1 = 45^\circ$ , передний угол  $\gamma = 15^\circ$ , задний угол  $\alpha = 15^\circ$ , угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = 7^\circ$ ; радиус при вершине  $r = 0,8$  мм. Исследовался процесс точения с коэффициентами асимметрии цикла колебаний  $\xi = 1/4, 1/3, 1/2, 2, 3$  и  $4$  на различных режимах резания. Результаты сравнивались с результатами обычного точения и вибрационного точения с гармоническими колебаниями ( $\xi = 1$ ).

Математическая модель влияния режимов резания на минимальную амплитуду колебаний инструмента получена на основе данных полного факторного эксперимента типа  $2^3$ ; в качестве факторов приняты подача, глубина и скорость резания. Математическая модель минимальной амплитуды для коэффициента асимметрии цикла колебаний  $\xi = 1/2$  имеет вид

$$A_{\min} = 0,00036 + 0,48775 \cdot S_0 + 0,02092 \cdot t - 0,00018 \cdot V.$$

Аналогичные регрессионные модели получены для процесса точения с другими коэффициентами асимметрии. Оценка этих моделей позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на минимальную амплитуду оказывает подача. Наименее значимым фактором является скорость резания. Взаимодействие факторов не оказывает существенного влияния на величину амплитуды. Объяснить влияние режимов резания на минимальную амплитуду можно следующим образом. Увеличение подачи влечет за собой увеличение толщины среза, что в свою очередь требует для разделения сливной стружки на элементы увеличения минимальной амплитуды колебаний. Теоретическая минимальная амплитуда составляет  $0,5S_o$ , но на практике эта величина может существенно изменяться из-за упругих деформаций системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) [2]. Зависимость минимальной амплитуды от глубины резания обусловлена изменением сил резания и, соответственно, упругих деформаций. Поэтому с ростом глубины резания следует увеличивать и минимальную амплитуду. Влияние скорости резания на минимальную амплитуду при точении с асимметричными колебаниями незначительно. Увеличение скорости резания ведет к росту температуры в зоне резания, что способствует размягчению тонкого слоя стружки, в результате чего снижается трение между стружкой и резцом [3; 4] и, следовательно, уменьшаются силы резания и упругие деформации системы СПИЗ. Таким образом, упругие деформации, возникающие в ходе обработки и зависящие от режимов резания, требуют увеличения минимальной амплитуды по сравнению с теоретической амплитудой на 5...50 % в зависимости от режимов обработки.

Для оценки качества поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента, в качестве параметра шероховатости принято среднее арифметическое значение  $Ra$ . На рисунке 1 представлен график зависимости шероховатости от подачи.

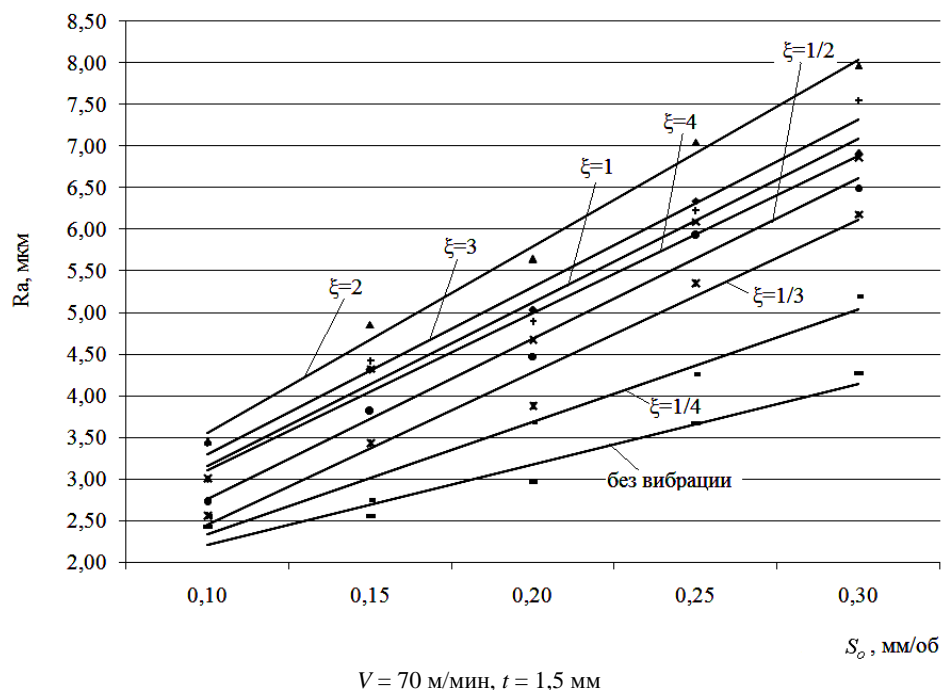


Рис. 1. Зависимость шероховатости от подачи

В отличие от обычного точения, где осевое расстояние между траекториями движения резца относительно детали на соседних витках одинаково и равно подаче на оборот  $S_o$ , при точении с симметричными колебаниями оно изменяется от нуля до максимального значения  $\Delta_{\max}$  [5]:

$$\Delta_{\max} = S_o \left( 1 + \frac{1}{\xi} \right) \text{ для } \xi > 1 \text{ и}$$

$$\Delta_{\max} = S_o (1 + \xi) \text{ для } \xi < 1.$$

В результате происходит увеличение высоты гребешков, остающихся после обработки. Таким образом, шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, возрастает с увеличением подачи и зависит от коэффициента асимметрии цикла колебаний.

Увеличение глубины резания приводит к снижению качества обработанных поверхностей (рис. 2). Влияние глубины резания на шероховатость можно объяснить упругим восстановлением деформированного слоя металла обработанной поверхности.

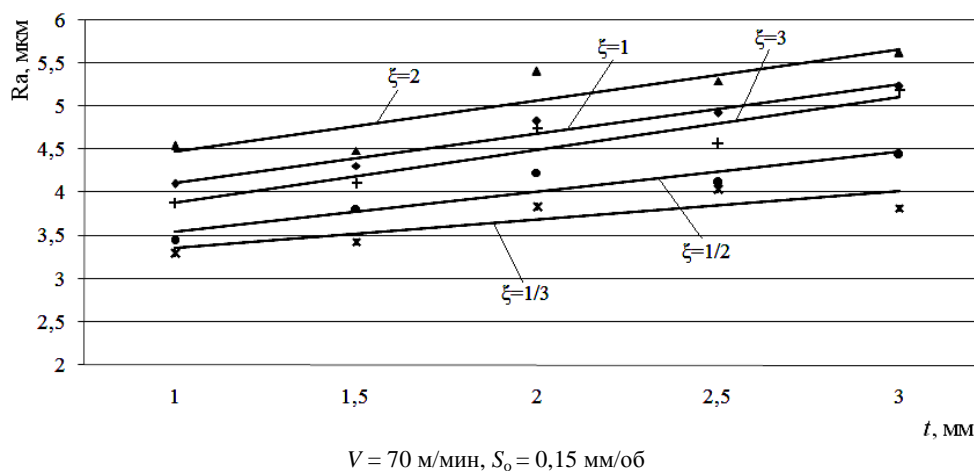


Рис. 2. Зависимость шероховатости от глубины резания

Скорость резания при обычном точении влияет на условия наростообразования, а следовательно и на шероховатость. При точении с вибрациями в связи с периодическим прекращением процесса резания условия для наростообразования отсутствуют, поэтому изменение скорости резания существенного влияния на шероховатость не оказывает.

Для определения математической зависимости шероховатости обработанных поверхностей от режимов резания реализован план полного факторного эксперимента. В качестве факторов приняты подача, глубина резания и скорость резания.

Математическую модель зависимости шероховатости от режимов резания в выбранных пределах варьирования для точения с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/3$  получим в виде

$$Ra = -0,01064 + 17,17050 \cdot S_o + 0,61261 \cdot t.$$

Аналогичные модели получены для процесса точения с другими коэффициентами асимметрии. Оценка этих моделей свидетельствует о том, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает подача. Зависимость шероховатости от коэффициента асимметрии носит нелинейный характер, о чем свидетельствуют данные, отображенные на рисунке 3.

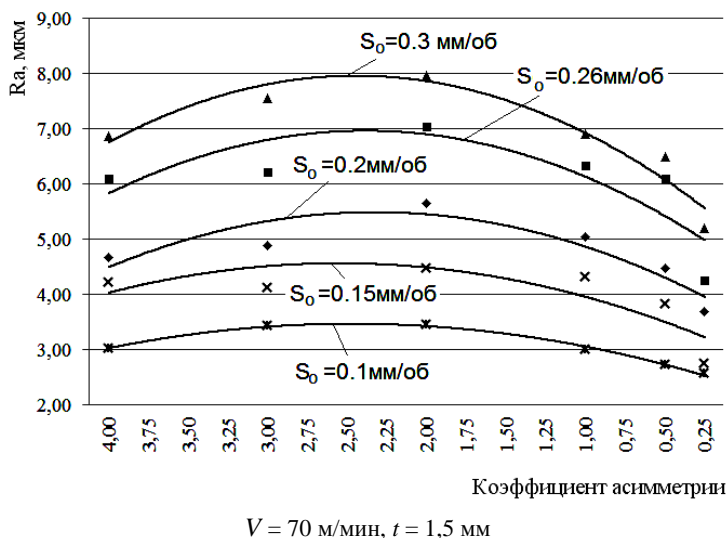


Рис. 3. Зависимость шероховатости от коэффициента асимметрии цикла

Графики рассматриваемой зависимости могут быть аппроксимированы квадратической функцией. Используя методику расчета, приведенную в [6], получены уравнения зависимости шероховатости от коэффициента асимметрии цикла для различных подач при обработке со скоростью резания  $V = 70$  м/мин и глубиной  $t = 1,5$  мм. Уравнение зависимости при подаче  $S_0 = 0,15$  мм/об имеет вид

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

Результаты исследования говорят о том, что шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, может быть уменьшена по сравнению с шероховатостью поверхности, полученной после вибрационного точения с гармоническими колебаниями. Так, при точении с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/4$  шероховатость поверхности уменьшается на 15...25 %. Уменьшение шероховатости обусловлено в первую очередь уменьшением максимального расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки и, следовательно, максимальной толщины среза. При определенных режимах резания точение с коэффициентами  $\xi < 1$  позволяет получать шероховатость поверхности, соответствующую чистовой обработке ( $Ra = 2,5...3,2$  мкм).

Максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки одинаково для коэффициентов асимметрии 2 и 1/2, 3 и 1/3, 4 и 1/4 и т.д. Однако шероховатость при точении с коэффициентом асимметрии меньше единицы, ниже, чем при точении с обратными им коэффициентами асимметрии. Эти результаты эксперимента обусловлены разницей в кинематике процесса обработки. При точении с колебаниями инструмента меняются кинематические углы 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 [7].

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает жесткость системы СПИЗ. Силы, возникающие в процессе точения, приводят к упругому отжиму инструмента от заготовки. В связи с тем, что силы резания, 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, уменьшаются и упругие деформации. При этом происходит врезание резца в заготовку и увеличение глубины впадины. Высокая шероховатость при точении с  $\xi > 1$  обусловлена более значимыми деформациями системы. Профилограммы поверхностей, полученных точением с коэффициентами асимметрии более единицы, имеют периодические глубокие впадины, характерные концу периода отвода инструмента (рис. 4). При этом увеличивается максимальная высота микронеровности  $R_{max}$ .

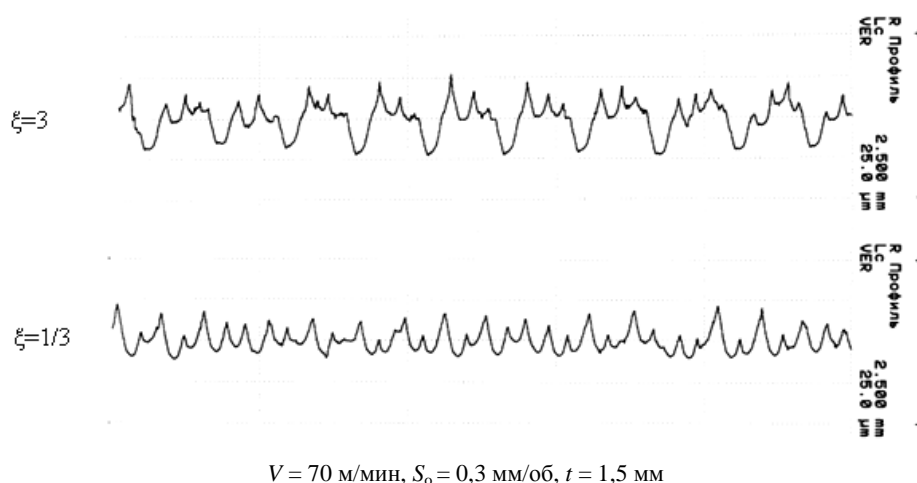


Рис. 4. Профилограммы поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента

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 [8]. Эти погрешности могут иметь место и при точении с асимметричными колебаниями.

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. С этой целью обработана партия деталей из стали 45 диаметром 35 мм в количестве 100 штук.

Детали обработаны на следующих режимах резания:

- подача 0,15 мм/об;
- глубина резания 1,5 мм;
- скорость резания 70 м/мин.

Образцы обточены на длину 50 мм. Обработка проводилась точением с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/3$ .

Статистический анализ полученных результатов позволяет утверждать, что распределение контролируемых параметров подчиняется закону Гаусса. Основной характеристикой эмпирического распределения является среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра  $\sigma$ . Среднее квадратическое отклонение диаметрального размера  $\sigma_p$  составляет 0,0103 мм.

Оценка погрешностей формы обработанных образцов в поперечном и продольном сечениях проводилась в соответствии с [9]. В результате статистического анализа получены следующие данные:

- среднее квадратическое отклонение формы в поперечном сечении  $\sigma_{ф.поп} = 0,002$  мм;
- среднее квадратическое отклонение формы в продольном сечении  $\sigma_{ф.пр} = 0,0015$  мм.

Величина среднего квадратического отклонения суммарной погрешности формы может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\sigma_{\phi_{поп}}^2 + \sigma_{\phi_{пр}}^2}.$$

Для экспериментальных данных

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{0,002^2 + 0,0015^2} = 0,0025 \text{ мм.}$$

Отношение среднего квадратического отклонения суммарной погрешности к величине среднего квадратического отклонения погрешности размера составляет

$$\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_p} = \frac{0,0025}{0,0103} = 0,24.$$

В этом случае, согласно [8], теоретическое поле рассеивания погрешности обработки

$$\omega_T = 6\sigma_p = 0,062 \text{ мм,}$$

что соответствует 9-му качеству точности.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие **выводы**:

1) минимальная амплитуда колебаний инструмента, достаточная для стружкодробления, увеличивается с ростом подачи и глубины резания. Действительная минимальная амплитуда больше теоретической, равной половине подачи на оборот, что связано с упругими деформациями системы СПИЗ. Так, для  $S_o = 0,075 \dots 0,3$  мм/об,  $V = 70$  м/мин и  $t = 1,5$  мм минимальная амплитуда увеличивается в сравнении с теоретической на 5...50 %;

2) шероховатость поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента, имеет прямую зависимость от подачи и глубины резания и выше, чем после обычного точения на тех же режимах резания. Однако она может быть снижена по сравнению с вибрационным точением с гармоническими колебаниями. Так, при точении с коэффициентом  $\xi = 1/4$  шероховатость при рассматриваемых режимах резания ( $S_o = 0,1 \dots 0,3$  мм/об,  $V = 70$  м/мин,  $t = 1,5$  мм) уменьшается на 15...25 % по отношению к  $\xi = 1$  и может достигать 2,5...3,2 мкм, что соответствует чистовой обработке;

3) точность размеров и формы обработанных поверхностей подчиняется нормальному закону распределения. При достаточной жесткости системы СПИЗ точность обработки точением с наложением

асимметричных колебаний инструмента может достигать 9...10 квалитетов точности, что соответствует получистовой и чистовой обработке на токарных станках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шелег, В.К. Анализ методов и способов стружкодробления в процессе токарной обработки / В.К. Шелег, С.С. Данильчик // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр.; Белорус. нац. техн. ун-т; под ред. В.К. Шелега. – Минск, 2013. – С. 73–80.
2. Коновалов, Е.Г. Осциллирующее точение / Е.Г. Коновалов, А.В. Борисенко. – Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1960. – 32 с.
3. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Данильчик, С.С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С.С. Данильчик, В.К. Шелег // Наука и техника. – 2013. – № 4. – С. 16–21.
6. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
7. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. школа, 1985. – 304 с.
8. Кораблев, П.А. Пути интенсификации точности обработки на металлорежущих станках в приборостроении / П.А. Кораблев. – М.: Машиностроение, 1974. – 120 с.
9. Муслина, Г.Р. Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов: учеб. пособие / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 220 с.

Поступила 14.07.2014

#### TURNING STRUCTURAL STEELS IMPOSED ON THE TOOL FEED ASYMMETRICAL VIBRATIONS

V. SHELEG, S. DANILCHIK

*The process of turning structural steel overlay to file tool asymmetric vibrations. The study revealed that the minimum amplitude of oscillation tool sufficient for chip breaking increases with feed and depth of cut. The roughness of surfaces treated with asymmetric vibrations turning tool, has a direct relationship to the feed and cutting depth and higher than normal after turning on the same cutting conditions.*