

Исследование процессов обработки

УДК 621.941

А. С. Манохин, Н. Е. Стахнив, С. А. Клименко (г. Киев)

Неровности поверхности, обработанной безвершинным косоугольным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ

Приведены результаты исследования закономерности изменения параметров неровностей поверхности, обработанной безвершинным косоугольным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, в зависимости от режимов резания и геометрических параметров инструмента.

***Ключевые слова:** косоугольный безвершинный инструмент, оснащенный ПСТМ, “бреющее” точение, волнистость, шероховатость поверхности, отклонение формы.*

Чистовую обработку труднообрабатываемых материалов высокой твердости (закаленные стали, высокопрочные, отбеленные чугуны) лезвийным инструментом из ПСТМ и минералокерамики проводят с подачами менее 0,10 мм/об. При этом стабильно обеспечивается шероховатость поверхности $Ra = 0,32—0,64$ мкм. Однако из-за применения низких значений подач и малых (0,2—0,4 мм) глубин резания, чистовая токарная обработка является относительно низкопроизводительным технологическим процессом. В этой связи на операции чистового точения перспективным является использование резцов с большими углами наклона режущей кромки, позволяющими реализовать безвершинную “бреющую” обработку наружных цилиндрических поверхностей с подачами, существенно превосходящими их общепринятые значения в рассматриваемых условиях, обеспечивая при этом высокое качество обработанной поверхности.

Бреющее точение характеризуется высоким уровнем силовых нагрузок, зачастую приводящих к появлению колебаний обрабатываемой детали и инструмента с большой амплитудой. Анализ профилограмм с обработанных поверхностей показал, что на величину и характер микронеровностей, кроме технологических режимов обработки и геометрических параметров режущего инструмента, оказывают влияние колебания и вибрации, возникающие в технологической системе. Последнее во многом зависит от состояния оборудования, на котором проводят исследования, его динамических характеристик, жесткости инструмента и заготовки и способа ее закрепления и т. д.

© А. С. МАНОХИН, Н. Е. СТАХНИВ, С. А. КЛИМЕНКО, 2009

Каждый из этих факторов может существенно повлиять на качество обработки. Поэтому для более глубокого понимания явлений, протекающих в зоне резания, а также с практической точки зрения, весьма важным является изучение отдельных составляющих микрогеометрии поверхностного слоя как одного из важнейших показателей процесса обработки, обусловленных влиянием различных факторов процесса, и выделение из них тех, которые являются характерными для данной обработки вне зависимости от типа и характеристик используемого оборудования.

Целью данной работы было экспериментальное исследование характера влияния режимов обработки и угла наклона режущей кромки λ на шероховатость поверхности, обработанной безвершинным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ.

Для проведения исследований изготовлен резец специальной конструкции, позволяющий изменять угол наклона режущей кромки ($\lambda = 0—90^\circ$). Обработку проводили резцом с неперетачиваемыми режущими пластинами SNUN 120308T из ПСТМ на основе КНБ марки киборит по ТУ 2-037-636—89 производства Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. При установке пластины в державку резца обеспечивали следующие геометрические параметры инструмента: передний угол — -10° , задний — -10° .

Экспериментальные исследования проводили при точении образца ($\varnothing 50$ мм) из стали 40X твердостью *HRC* 48,5—50,5. Условия обработки: глубина резания $t = 0,15$ мм, подача $S = 0,10—0,95$ мм/об, скорость резания $v = 0,5—2,5$ м/с, угол наклона режущей кромки $\lambda = 20—50^\circ$.

Под геометрическими характеристиками состояния поверхностного слоя понимают параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений профиля поверхности [1]. Приборы для измерения геометрических характеристик поверхности (например, “Talysurf 5M120” фирмы “Renk Teylor Hobson”, Великобритания) предусматривают возможность получения показателей, характеризующих как шероховатость, так и волнистость. Недостатком данного оборудования является то обстоятельство, что разделение на шероховатость и волнистость происходит посредством неизменных электрических фильтров, что обуславливает появление погрешности измерения. Для снижения погрешности измерения это разделение необходимо выполнять с учетом конкретного измеренного профиля. С этой целью предложено в каждом конкретном случае анализа совокупности ординат профиля исследуемой поверхности формировать специальное окно сглаживания, размер которого обусловлен количеством задействованных в процессе сглаживания точек. Правильный выбор размера окна позволяет разделить исследуемую совокупность ординат профиля поверхности на различные составляющие. Процесс разделения контролируют визуально на экране дисплея компьютера, что позволяет достаточно точно выделять шероховатость и волнистость профиля.

Для проведения экспериментальных исследований аналоговый профилограф-профилометр “Surtronic-3” (фирма “Renk Teylor Hobson”, Великобритания) был соединен с ПК и разработана программа, которая корректирует исходные данные, выполняет выделение составляющих шероховатости и волнистости, а также производит расчет их параметров.

Рассмотрим некоторые характерные варианты анализа шероховатости на примере поверхности, обработанной “бреющим” точением: 1 — волнистость не оказывает влияния на результаты измерения высотных параметров микронеровностей стандартными приборами; 2 — определение таких параметров

как Ra , R_m , R_{max} без отделения волнистости вносит существенную погрешность в результаты измерений; 3 — оценка высоты микронеровностей в случае возникновения вибраций в технологической системе.

На рис. 1, *a* показан традиционный профиль поверхности, обработанной косоугольным “бреющим” точением. Анализ профилограммы (см. рис. 1, *a*) показывает, что исследуемый сигнал содержит:

- волнистость;
- периодически повторяющуюся составляющую шероховатости;
- стохастическую составляющую шероховатости.

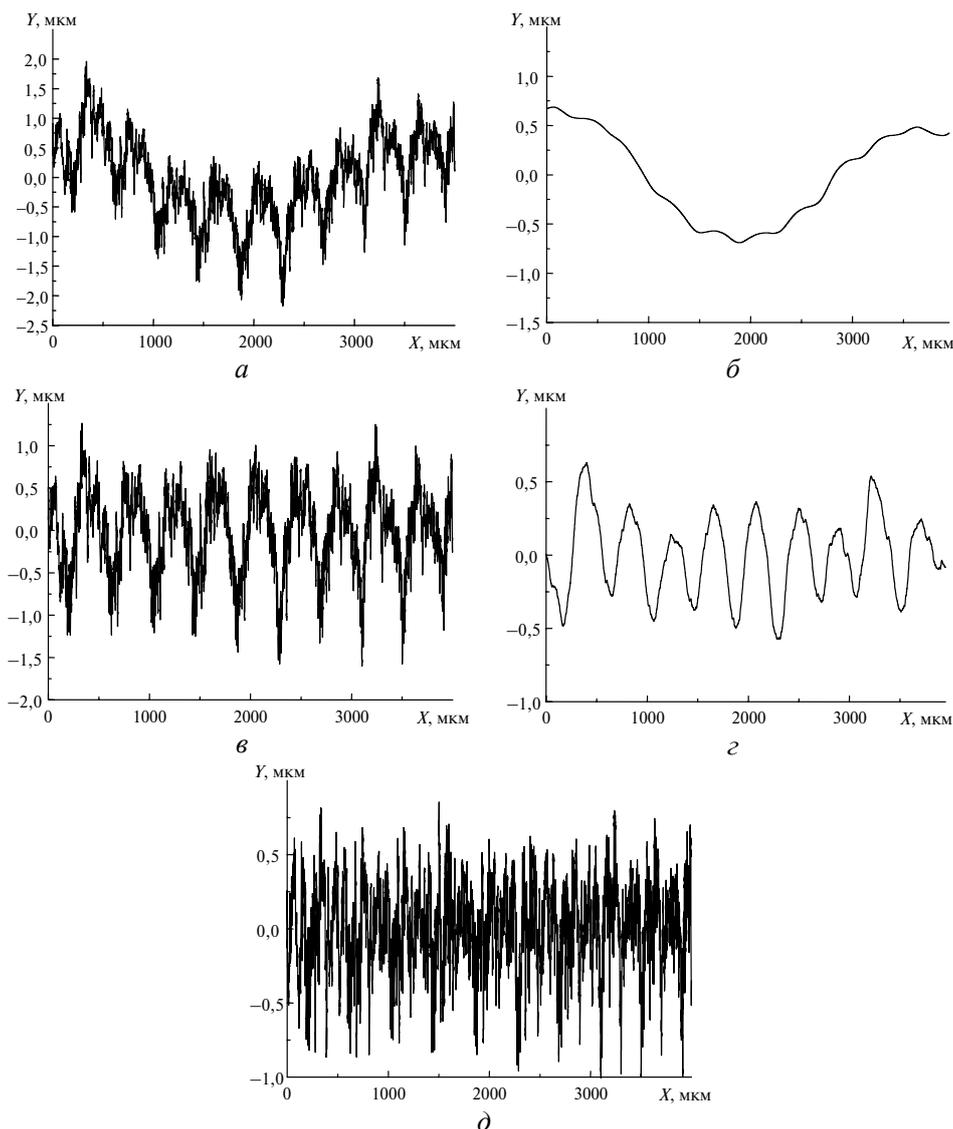


Рис. 1. Исходная профилограмма обработанной поверхности (*a*), участок волнистости (*б*), шероховатость поверхности после устранения волнистости (*в*), микропрофили, соответствующие шероховатости первого (*г*) и второго (*д*) порядков; $\lambda = 50^\circ$, $S = 0,38$ мм/об, $v = 0,85$ м/с.

Выполняя сглаживание, получаем микропрофиль поверхности после устранения волнистости (см. рис. 1, *в*). Микронеровности поверхности после

устранения волнистости содержат периодическую компоненту с периодом 670 мкм и стохастическую аperiodическую составляющую. Средняя линия профиля аппроксимируется прямой. Численно величина периода совпадает с подачей инструмента ($S = 0,67$ мм/об), поэтому можно предположить, что микропрофиль (см. рис. 1, в) формируется в зависимости от условий формообразования поверхности и состояния рабочих участков режущего инструмента. На рис. 1, з показана составляющая шероховатости микропрофиля, обусловленная процессом формообразования, — совместным влиянием величины подачи и угла наклона режущей кромки. Условно обозначим ее составляющей первого порядка (низкочастотной). А периодическую составляющую (высокочастотную) с величиной шага меньшей, чем величина продольной подачи, — шероховатостью второго порядка (рис. 1, д). Данная составляющая определяется, в основном, высокочастотными колебаниями режущего инструмента, состоянием его режущей кромки и пластическими явлениями в зоне резания. Параметры профиля поверхности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры профиля поверхности после точения (вариант 1)

Характеристики профиля	Параметры			
	Ra	Rq	R_{tm}	R_{max}
Исходный (см. рис. 1, а)	0,56	0,69	2,65	2,82
Микропрофиль поверхности после устранения волнистости (см. рис. 1, в)	0,39	0,49	2,53	2,83
Составляющая шероховатости первого порядка (см. рис. 1, з)	0,49	0,58	1,23	1,18
Составляющая шероховатости второго порядка (см. рис. 1, д)	0,24	0,3	1,75	1,93
	Ra_w	Rq_w	R_{tmw}	R_{max_w}
Волнистость (см. рис. 1, б)	0,45	0,49	0,54	0,50

Таким образом, разделение профиля обработанной поверхности на составляющие, позволяет:

- оценить влияние режимов обработки на состояние поверхностного слоя, исключая влияние характеристик конкретного оборудования;
- оценить влияние состояния режущего инструмента на высокочастотную составляющую микропрофиля.

На рис. 2 показаны исходный профиль поверхности, отличающийся большой высотой волн при относительно небольшом их шаге, волнистость и шероховатость поверхности после устранения волнистости. В данном случае значительная высота волн при относительно небольшом их шаге делает невозможной аппроксимацию средней линии профиля прямой, что искажает величину высотных параметров микронеровностей. Как следует из анализа данных, представленных в табл. 2, в случае, когда волнистость не отсеивается, высота микронеровностей завышена по параметрам Ra , R_{tm} и R_{max} . Сравнивая также данные табл. 2 и 3, отметим, что если в первом варианте устранение волнистости почти не влияет на величину параметров R_{tm} и R_{max} , то для второго варианта это различие существенно и достигает 15 %.

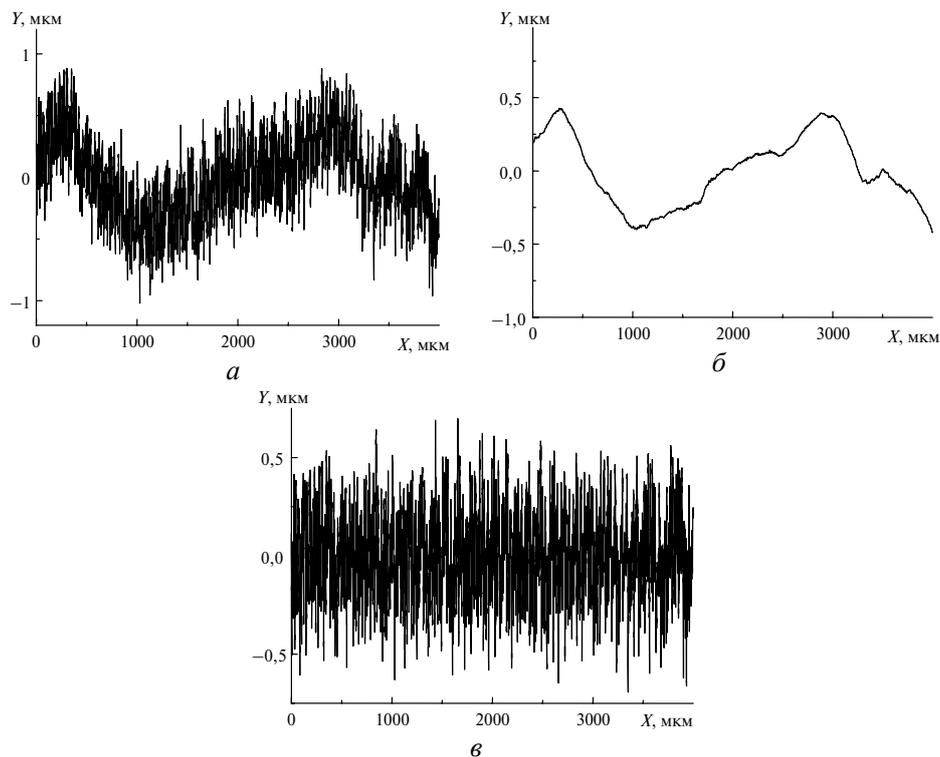


Рис. 2. Исходная профилограмма обработанной поверхности с большой высотой волн (*a*), волнистость (*б*), шероховатость поверхности после устранения волнистости (*в*); $\lambda = 30^\circ$, $S = 0,1$ мм/об, $v = 0,85$ м/с.

Таблица 2. Параметры профиля поверхности после точения (вариант 2)

Характеристики профиля	Параметры			
	Ra	Rq	R_{tm}	R_{max}
Исходный (см. рис. 2, <i>a</i>)	0,27	0,33	1,45	1,51
Микропрофиль поверхности после устранения волнистости (см. рис. 2, <i>в</i>)	0,18	0,22	1,26	1,32
	Ra_w	Rq_w	R_{tmw}	R_{max_w}
Волнистость (см. рис. 2, <i>б</i>)	0,2	0,24	0,41	0,63

На рис. 3 показана профилограмма поверхности для случая, когда в зоне резания имели место автоколебания, а на обработанной поверхности наблюдали характерные следы в виде отклонений формы.

Разделяя волнистость, связанную с вибрациями, и шероховатость, представляющую собой сумму микронеровностей первого и второго порядков, видим, что высотные параметры микронеровностей существенно выше, чем в случае, показанном на рис. 2, *в*, несмотря на меньшую величину угла наклона режущей кромки. Указанный факт объясняется большей амплитудой колебаний инструмента и большей интенсивностью течения металла в зоне контакта задняя поверхность резца—обрабатываемый материал. Как видно из сравнения рис. 2, *б* и 3, *б*, волнистость поверхности в последнем случае отличается большей высотой пиков, а профиль поверхности менее регулярен, что требу-

ет при анализе совокупности ординат профиля обработанной поверхности выполнять сглаживание на более узких отрезках средней линии профиля. Соответственно ширина окна сглаживания в данном случае меньше. Даже в случае обработки на оборудовании с большей жесткостью в диапазоне малых (0,1—0,3 мм/об) подач и малых (10—20°) углов наклона режущей кромки зачастую возникают вибрации, что является характерной особенностью “бреющего” точения. Чтобы выделить указанную особенность, на графиках зависимости высоты микронеровностей от режимов обработки значения параметров Ra , R_{tm} и R_{max} приведены как для интегрального профиля, так и для профиля, программно сформированного после устранения следов вибраций.

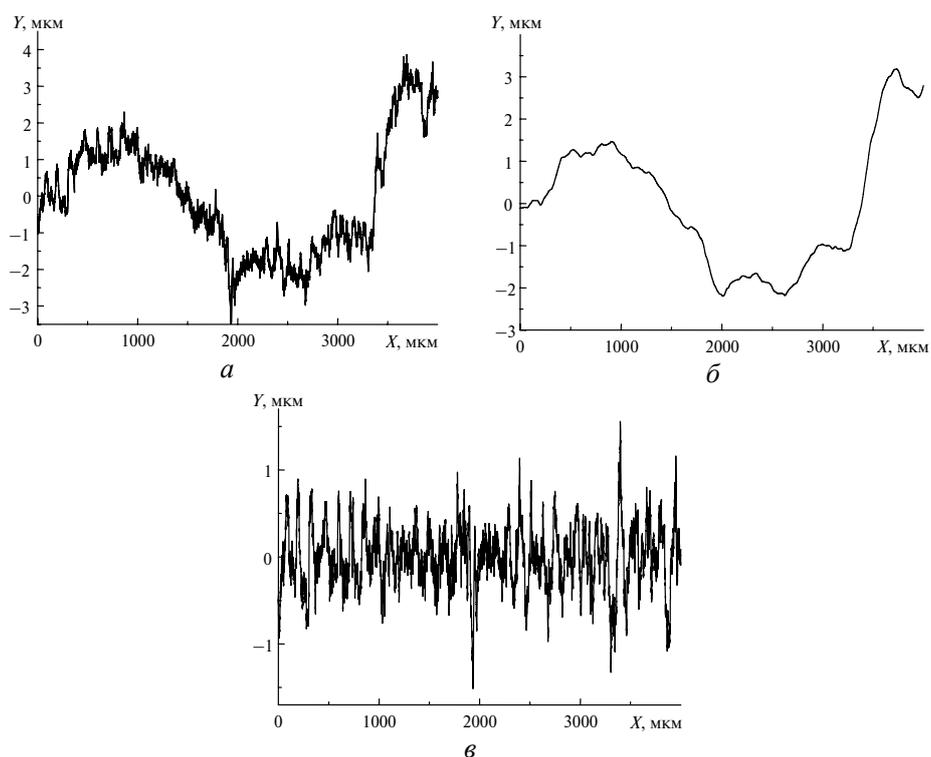


Рис. 3. Исходная профилограмма обработанной поверхности с отклонением формы (а), отклонение формы (б), шероховатость поверхности после устранения отклонения формы (в); $\lambda = 20^\circ$, $S = 0,1$ мм/об, $v = 0,85$ м/с.

Таблица 3. Параметры профиля поверхности после точения (вариант 3)

Характеристики профиля	Параметры			
	Ra	Rq	R_{tm}	R_{max}
Исходный профиль (см. рис. 3, а)	1,36	1,59	3,68	5,91
Микропрофиль поверхности после устранения отклонения формы (см. рис. 3, в)	0,28	0,36	2,19	2,88
	Ra_w	Rq_w	R_{tmw}	R_{max_w}
Отклонение формы (см. рис. 3, б)	1,3	1,52	2,14	4,32

На рис. 4 представлены зависимости шероховатости обработанной поверхности от параметров процесса обработки, построенные по экспериментальным данным. Величину шероховатости поверхности определяли с учетом описанной выше методики. Анализ показывает, что с ростом подачи среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra монотонно возрастает в диапазоне углов наклона режущей кромки $\lambda = 40\text{--}50^\circ$. При величине $\lambda = 30^\circ$ и подачах $S = 0,1\text{--}0,7$ мм/об зависимость остается монотонно растущей, а в диапазоне подач $S = 0,70\text{--}0,95$ мм/об наблюдается существенное снижение ее влияния на высотные параметры шероховатости поверхности. В наименьшей степени от величины подачи зависит максимальная высота неровностей R_{\max} . Влияние подачи на высоту микронеровностей тем интенсивнее, чем больше угол наклона λ .

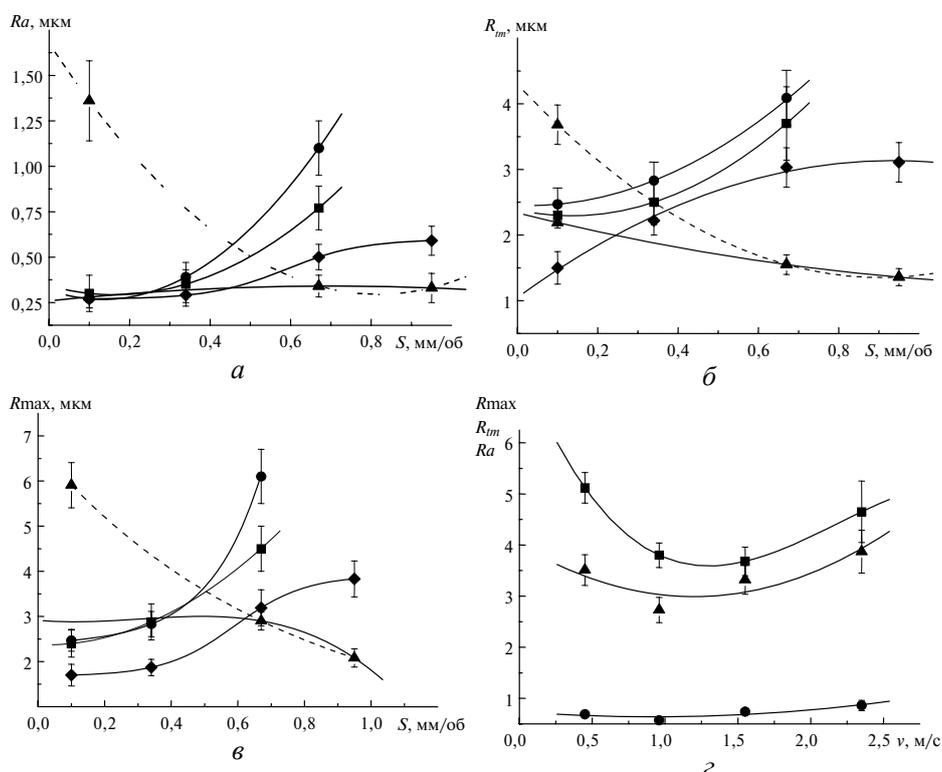


Рис. 4. Влияние условий обработки на шероховатость обработанной поверхности: $Ra = f(S, \lambda)$ (а), $R_{\max} = f(S, \lambda)$ (б), $Rz = f(S, \lambda)$ (в), $\lambda = 20$ (▲), 30 (◆), 40 (■), 50 (●) град; Ra (●), R_{\max} (■), $R_{tm} = f(v)$ (▲) (г), $\lambda = 50^\circ$, $S = 0,67$ мм/об.

Для повышения качества поверхности после обработки с ростом подачи величину λ необходимо снижать, однако, как следует из представленных графиков, при $S < 0,6$ мм/об инструмент с $\lambda = 30^\circ$ обеспечивает более высокое качество обработки, чем резец, режущая кромка которого имеет угол наклона 20° . В условиях данного эксперимента минимальная высота микронеровностей была обеспечена при $S = 0,1\text{--}0,3$ мм/об, $\lambda = 30^\circ$ и составляла $Ra = 0,25\text{--}0,32$ мкм. Шероховатость поверхности, соответствующую требованиям $Ra \leq 0,63$ мкм, $R_{tm} \leq 4$ мкм, можно обеспечить, применяя следующие сочетания режимов резания и геометрических параметров инструмента: $S = 0,5$ мм/об и $\lambda = 50^\circ$, $S = 0,6$ мм/об и $\lambda = 40^\circ$, $S = 1,0$ мм/об и $\lambda = 20\text{--}30^\circ$.

В меньшей степени шероховатость поверхности зависит от скорости резания. Эмпирические данные (см. рис. 4, *з*) свидетельствуют о снижении шероховатости в диапазоне скоростей 0,9—1,2 м/с. При дальнейшем увеличении скорости резания наблюдается рост высоты микронеровностей, более интенсивный при больших подачах.

Характер зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи и угла наклона режущей кромки объясняется следующим образом. Анализ кинематико-геометрических особенностей “бреющего” течения показывает, что высота микронеровностей должна монотонно возрастать с увеличением указанных параметров. Увеличение с ростом подачи сил резания, которые при косоугольном безвершинном тчении достигают весьма высоких значений, также должно приводить к росту шероховатости обработанной поверхности. На практике этому соответствуют правые ветви эмпирических зависимостей.

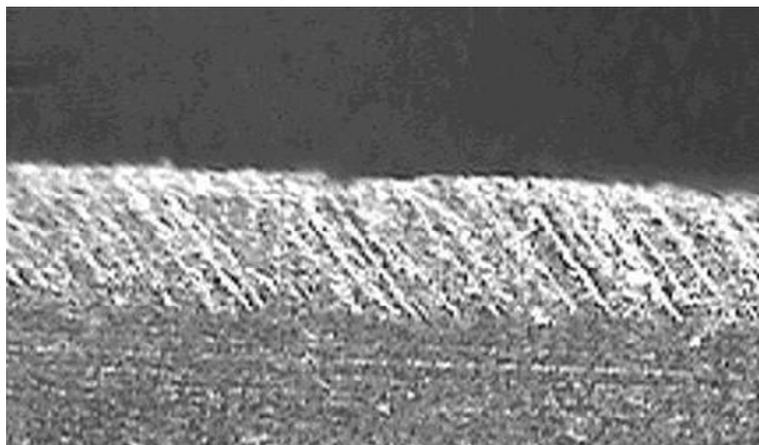
В случае, когда подача и угол наклона меньше оптимальных значений, рост микронеровностей обусловлен влиянием на процесс пластической деформации параметров сечения среза. Расчет показывает, что, несмотря на большие подачи, средняя толщина среза при “бреющем” тчении очень мала. Средняя толщина среза a_{cp} сопоставима с величиной радиуса округления режущей кромки и составляет в рассматриваемом диапазоне 4—50 мкм. В данном случае имеет место явление, подобное наблюдаемому при обработке обычным резцом: росту микронеровностей при снижении подач до 0,01—0,02 мм/об.

При столь малых толщинах среза увеличивается доля участка контакта резца с обрабатываемым материалом на округленной режущей кромке, действительный передний угол снижается, а усадка стружки соответственно увеличивается. Ухудшаются условия пластического деформирования материала в зоне резания, процесс стружкообразования становится нестабильным, что ведет к снижению качества обработки.

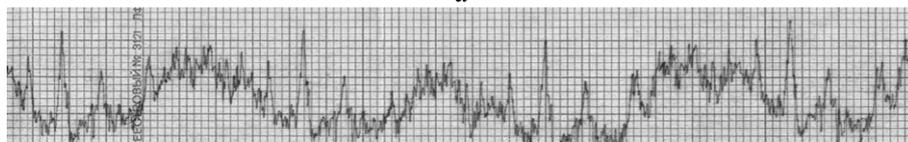
Кроме того, очень мало и отношение средней толщины среза к длине контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом, так как ширина среза находится в пределах 3—8 мм, увеличиваясь с уменьшением угла λ . Малые отношения a_{cp}/L повышают вероятность возникновения вибраций в технологической системе. Так, при тчении резцом с углом наклона $\lambda = 20^\circ$ и подачами 0,1—0,4 мм/об резание сопровождается автоколебаниями, а на поверхности обработанной заготовки наблюдаются следы вибраций в виде огранки. Средняя толщина среза составляет при этом 2—8 мкм, а отношение средней толщины к длине активной части режущей кромки — $10,5 \cdot 10^{-4}$. Указанное ухудшает качество обработанной поверхности, а стойкость инструмента резко снижается ввиду появления микровыкрашиваний и сколов режущей кромки.

Степень износа инструмента и состояние режущей кромки являются факторами, оказывающими сильное влияние на шероховатость обработанной поверхности. На рис. 5, *а* показана фаска износа на задней поверхности резца. На контактной поверхности инструмента отчетливо видны характерные борозды, которые имеют направление, совпадающее с направлением вектора результирующей скорости резания, и, соответственно, угол их наклона по отношению к кромке равен $90^\circ - \lambda$. Совокупность борозд формирует микро-рельеф участка задней поверхности резца, который копируется на обработанной поверхности в виде повторяющихся близких по форме микронеровностей, расстояние между которыми соответствует величине подачи. На профилеграмме (см. рис. 5, *б*) видно, что высота выступов, появляющихся на

обработанной поверхности вследствие вырывания отдельных зерен из поликристаллического инструмента при износе, может быть весьма значительной, достигая 2—3 мкм. Оценка высоты микронеровностей второго порядка, вызванных эффектом копирования, пластическими явлениями в зоне контакта и т. п., и определяемая в данном случае параметром R_{tm} , показывает, что их значения находятся в пределах 1,4—2,4 мкм.



a



б

Рис. 5. Вид изношенной задней поверхности инструмента (*a*) и профилограмма обработанной поверхности (*б*).

Чтобы снизить влияние копирования на обработанную поверхность дефектов фаски износа инструмента, угол наклона режущей кромки нужно периодически изменять.

Как следует из вышеизложенного, при “бреющем” точении основными факторами, влияющими на шероховатость обработанной поверхности, являются подача, угол наклона и микрорельеф режущей кромки инструмента, с которыми геометрически связана высота детерминированных микронеровностей, а также пластические явления, обуславливающие случайную составляющую шероховатости поверхности. При этом с уменьшением толщины среза влияние последнего фактора возрастает.

Результаты выполненных исследований показали широкие возможности компьютерного анализа совокупности ординат профиля обработанной поверхности с разделением ее на различные составляющие: отклонение формы; волнистость; шероховатость, обусловленную процессом формообразования (составляющая первого порядка); шероховатость, определяемую состоянием режущей кромки инструмента и пластическими явлениями в зоне резания (составляющая второго порядка). Такой подход позволяет оценить качество обработки, достигаемое с использованием данного типа инструмента вне зависимости от характеристик используемого оборудования.

В целом процесс безвершинного точения режущим инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, позволяет обеспечить шероховатость обрабо-

танной поверхности $Ra = 0,25—0,63$ мкм при высокой производительности чистовой обработки ($S = 0,3—1$ мм/об).

1. *Дунин-Барковский И. В., Карташова А. И.* Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. — М.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
2. *Девин Л. Н., Стахнив Н. Е.* Автоматизированная система исследования процесса резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. — Вып. 70. — С. 54—56.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 19.08.08