

УДК 621.941

**Н. Е. Стахнив, Л. Н. Девин, И. А. Петруша,
А. С. Осипов** (г. Киев)

Динамические явления при чистовом точении закаленных сталей инструментом из композита на основе КНБ

Приведены результаты исследования процесса чистового точения закаленной стали ХВГ твердостью HRC 60–62 инструментом, оснащенным круглой режущей вставкой из композита на основе кубического нитрида бора (система cBN—Si₃N₄). Установлено влияние технологических режимов обработки на составляющие силы резания, величину вибраций, шероховатость обработанной поверхности. Приведены практические рекомендации по выбору режимов и условий обработки.

Ключевые слова: чистовое точение, композит, кубический нитрида бора, режим обработки, силы резания, шероховатость, вибрация.

Колебания элементов технологической системы станка при резании материалов — сложный процесс, интенсификация которого снижает производительность обработки, точность обрабатываемой поверхности и надежность режущего инструмента. Особенно отрицательное влияние на точность формы и шероховатость обработанных поверхностей оказывают вынужденные колебания и автоколебания элементов технологической системы. Как правило, данные виды колебаний возникают, когда условия обработки и режимы резания с течением времени изменяются. Однако даже при стационарных условиях точения, когда режимы резания остаются стабильными, могут наблюдаться автоколебания [1]. Как показали экспериментальные исследования, в этом случае высота неровностей на обработанной поверхности составляет десятки микрометров [2].

В настоящее время точение закаленных сталей наиболее производительно и качественно выполняют инструментом, оснащенным поликристаллическим сверхтвердым материалом (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ). Использование такого инструмента позволяет при обработке закаленных сталей в 5—10 раз увеличить скорость резания по сравнению с твердосплавными резцами [3]. Но вместе с тем высокоскоростной процесс резания закаленных сталей резцами на основе КНБ зачастую сопровождается нестабильностью силовых характеристик, что отрицательно влияет на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности [4].

Для улучшения стойкости инструмента при динамических нагрузках разработан режущий композиционный материал на основе кубического нитрида бора, содержащий низко модульную химически инактивную к нитриду бора добавку нитрида кремния [5, 6]. Спекание композита осуществляют при высоких статических давлениях (7—8 ГПа) и температурах (2100—2200 °С). Исследования показали, что введение в исходную шихту 2,5—5 % (по массе) высокодисперсного Si₃N₄ позволяет получать композит cBN—Si₃N₄ с высо-

кой твердостью и трещиностойкостью. Материал характеризуется следующими физико-механическими характеристиками: плотность — 3,45—3,47 г/см³, твердость по Виккерсу (нагрузка на индентор 150 Н) — 41,3±2,8 ГПа, трещиностойкость — 10,2±02 МН·м^{-3/2}, модуль Юнга — 810±20 ГПа [6].

Анализ установленных физико-механических характеристик позволяет предположить, что режущий инструмент, оснащенный композитом cBN—Si₃N₄, может реализовать обработку закаленных сталей без скалывания режущей кромки резца при наличии вынужденных колебаний и автоколебаний. При этом целесообразно использовать резцы, оснащенные пластинами круглой формы, так как они не нуждаются в сложной переточке, а за счет поворота пластин на 2—3 градуса можно получить новую режущую кромку инструмента. В то же время, при точении резцами с пластинами круглой формы возникают неблагоприятные условия контакта инструмента с деталью, способствующие появлению автоколебаний [2]. Поэтому для более глубокого понимания явлений, протекающих в зоне резания, а также для практической реализации высокопроизводительного прецизионного точения круглыми пластинами из композита cBN—Si₃N₄ закаленных сталей необходимо выполнить дополнительные экспериментальные исследования процесса обработки и установить факторы, которые обуславливают возрастание амплитуды колебаний инструмента.

Цель предлагаемой работы — экспериментально исследовать динамические явления при точении резцами с круглыми пластинами из композита cBN—Si₃N₄ и определить условия и режимы обработки, при которых достигается вибрационная устойчивость процесса резания.

Работоспособность резцов из керамического композита cBN—Si₃N₄ изучали на автоматизированном стенде на базе токарного станка с ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [7]. Экспериментальные исследования выполняли при чистовом точении образца диаметром $d = 52,9$ мм из закаленной стали ХВГ (С — 1 %, Cr — 1 %, W — 1,4 %, Mn — 1 %, Si — 0,3 %, остальное — Fe [8]) твердостью HRC 60—62. Резец с механическим креплением круглой режущей пластины керамического композита диаметром $7 \pm 0,025$ мм имел геометрические параметры: передний угол $\gamma = -10^\circ$; задний угол $\alpha = 10^\circ$. Экспериментальная серия состояла из шести опытов. Скорость резания v и глубина резания t во всех опытах были фиксированы: $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм. Изменение подачи обуславливало широкое многообразие динамических явлений при обработке (отсутствие и наличие автоколебаний с различными величинами амплитуд). Использовали дискретные значения подач S — 0,021, 0,042, 0,083, 0,125, 0,166, 0,208 мм/об. Составляющие силы резания P_x , P_y и P_z измеряли с помощью динамометра УДМ-100. Акселерометр (датчик KD-35 фирмы MMF, Германия) использовали для преобразования механических колебаний резца в электрические сигналы пропорциональные ускорению колеблющегося инструмента и для определения параметров вибрации. Датчик закрепляли в нижней части резца, максимально приближенно к зоне резания. Его рабочий диапазон частот — 10—10000 Гц. Сигналы от динамометра по трем каналам через усилитель и от акселерометра поступали на АЦП ADA-1406, управление которого осуществляли с помощью программы Power Graph. Частота опроса составляющих сил резания и акселерометра была 85 кГц. Для исследования шероховатости обработанной поверхности применяли аналоговый прибор “Surtronic-3” (фирма “Renk Teylor Hobson”, Великобритания), соединенный с ПК. Была создана программа, которая позволяла на основании за-

писанных профилограмм обработанных поверхностей выделять шероховатость и волнистость, а также произвести расчет их параметров. Для каждого выполненного опыта для составляющих силы резания P_x , P_y и P_z , а также для колебаний резца проводили обработку данных, которая включала их коррекцию (исключение погрешностей измерений), статистические расчеты, определение корреляционных функций, аппроксимацию тригонометрическими рядами Фурье.

Предварительная обработка полученных результатов показала, что при измерении составляющих силы резания эти данные искажаются систематической погрешностью установки нуля, а также дрейфом нуля в течение времени обработки. Данные погрешности исключали программными методами [9]. Для этого эксперимент проводили таким образом, что измерения начинали заранее, до процесса врезания резца в заготовку и продолжали после выхода инструмента из детали. Полученные данные содержали информацию о врезании в заготовку, непрерывном процесс резания и о выходе инструмента из зоны резания. Для последующего анализа из всего массива с помощью компьютерной программы удаляли те данные, которые не имели отношения к стационарному процессу резания.

На рис. 1 приведены осциллограммы составляющих силы резания, из анализа которых следует, что $P_x(\tau)$, $P_y(\tau)$, $P_z(\tau)$ с течением времени τ непрерывно изменяются, причем величина составляющей $P_x(\tau)$ существенно меньше $P_y(\tau)$ и $P_z(\tau)$. Следует также отметить, что характер изменения $P_y(\tau)$ и $P_z(\tau)$ отличается. На рис. 1, б приведены осциллограммы составляющей силы резания $P_y(\tau)$ для трех характерных случаев. Видно, что в зависимости от величины подачи значение и характер $P_y(\tau)$ существенно меняются.

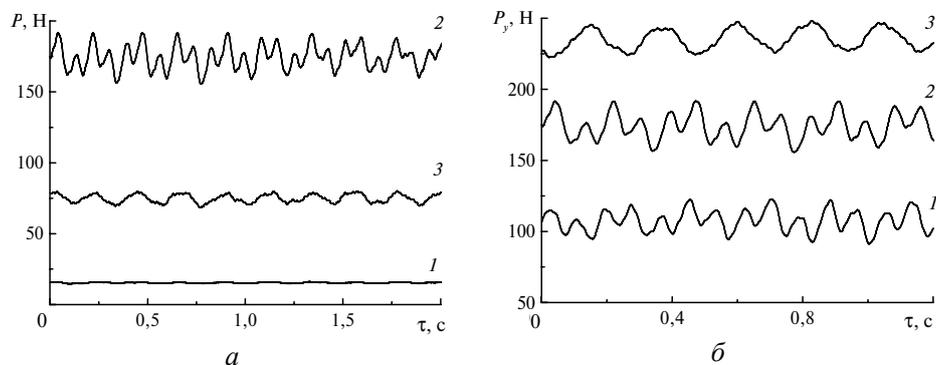


Рис. 1. Осциллограммы составляющих силы резания $P_x(\tau)$ (1), $P_y(\tau)$ (2), $P_z(\tau)$ (3) при режиме обработки: $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ мм/об (а) и $P_y(\tau)$ при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,042$ (1), $0,125$ (2), $0,208$ (3) мм/об (б).

Важно выяснить, обусловлены ли изменения составляющих сил резания с течением времени стохастическими возмущениями или они носят закономерный, регулярный характер. Для решения этой задачи использовали аппарат корреляционного анализа [10], в соответствии с которым для каждого сигнала определяли корреляционную функцию [11].

Разработана программа для расчета автокорреляционной функции, в которой максимальное время задержки составило $0,5T$, где T — участок времени, на котором производили измерение. На рис. 2 приведены два характерных спектра изменения корреляционных функций, которые указывают на законо-

мерный характер изменения составляющей силы резания и незначительное влияние стохастических возмущений [10].

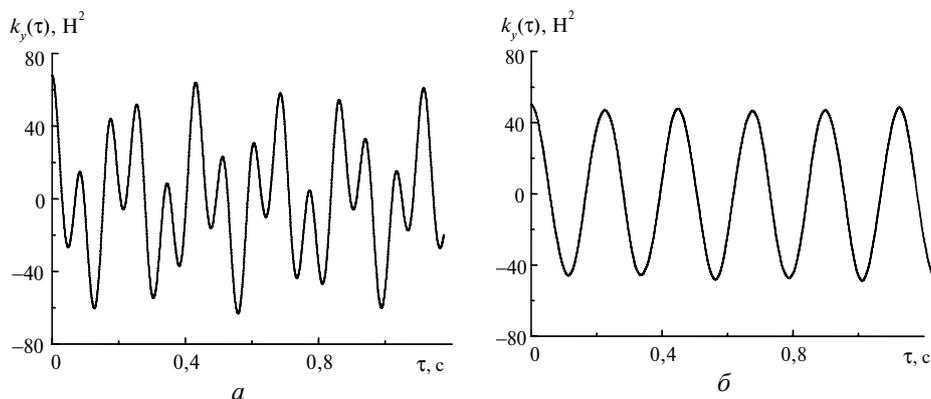


Рис. 2. Корреляционная функция $k_y(\tau)$ составляющей силы резания $P_y(\tau)$ при режиме обработки: $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ (а), $0,208$ мм/об (б).

Выполненный анализ автокорреляционных функций показал, что изменения составляющих силы резания $P_y(\tau)$, $P_z(\tau)$ в течение времени носят регулярный характер, а стохастическими возмущениями для данных функций можно пренебречь. Для $P_x(\tau)$ величина стохастических изменений составила 30—50 % от величины регулярных. Учитывая, что P_y , P_z в несколько раз превышали по величине P_x (см. рис. 1, а), стохастическим разбросом $P_x(\tau)$ в дальнейшем анализе и расчетах пренебрегали.

Для определения основных частот, амплитуд и фаз колебаний была выполнена аппроксимация изменения величины составляющей силы резания тригонометрическим рядом Фурье [12].

На рис. 3 приведены два характерных спектра амплитуд составляющих силы резания, из которых следует, что составляющая силы резания $P_y(\tau)$ при режимах обработки $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм; $S = 0,125$ мм/об содержит две доминирующие частоты колебаний — $f_1 = 4,57$ Гц и $f_2 = 11,61$ Гц (см. рис. 3, а), а при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,208$ мм/об — одну — $f_1 = 4,46$ Гц (см. рис. 3, б).

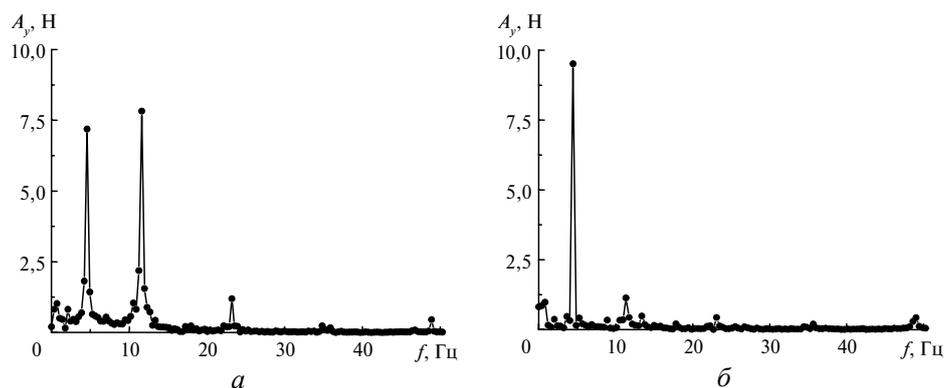


Рис. 3. Спектр амплитуд составляющей силы резания P_y при режиме обработки: $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ (а), $0,208$ (б) мм/об.

Анализ спектров для всех составляющих силы резания показал, что максимальных значений амплитуды колебаний достигают при двух частотах: $f_1 =$

4,50±0,08 Гц и $f_2 = 11,65 \pm 0,14$ Гц. Амплитуды колебаний на остальных частотах более чем в 5 раз меньше максимального значения. Поэтому для целей наших исследований этими колебаниями можно пренебречь. Составляющие силы резания в общем случае можно аппроксимировать аналитическим выражением

$$P(\tau) = \bar{P} + A_1 \cos(f_1 \tau + \Delta\varphi_1) + A_2 \cos(f_2 \tau + \Delta\varphi_2), \quad (1)$$

где $P(\tau)$ — одна из составляющих силы резания ($P_x(\tau)$, $P_y(\tau)$, $P_z(\tau)$); \bar{P} — математическое ожидание составляющей силы резания $P(\tau)$; f_1, f_2 — доминирующие частоты; A_1, A_2 — амплитуды колебаний; $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ — фазы колебаний.

Также установлено, что при подачах $S = 0,021, 0,166$ и $0,208$ мм/об амплитуда A_2 , оставаясь второй по величине, более чем в 5 раз меньше A_1 . Поэтому в данных случаях формулу (1) для составляющих силы резания можно существенно упростить:

$$P(\tau) = \bar{P} + A_1 \cos(f_1 \tau + \Delta\varphi_1).$$

Следует также заметить, что значение частоты $f_2 = 11,65 \pm 0,14$ Гц с высокой точностью совпадает с частотой вращения шпинделя

$$f_{\text{ш}} = \frac{n}{60},$$

которая в данных экспериментах составила $11,7 \pm 0,2$ Гц. В [2] показано, что при точении заготовок с эксцентричным припуском сила резания колеблется с частотой равной частоте вращения шпинделя станка. Перед проведением экспериментов для уменьшения эксцентриситета поверхность заготовок предварительно протачивали. Последующее измерение полученного профиля показало, что неравномерность распределения припуска перед точением (биением поверхности заготовки) составила $0,02$ мм, причем припуск был расположен эксцентрично. Поэтому можно предположить, что колебания на частоте f_2 обусловлены эксцентricностью расположения припуска.

Следует также заметить, что для всех выполненных опытов справедливо соотношение $f_1 \approx 0,386 f_2$. В ряде опытов на частотах $f_3 = 23,8 \pm 0,2$ Гц и $f_4 = 48,7 \pm 0,3$ Гц наблюдали незначительные по величине (по сравнению с амплитудами на частотах f_1 или f_2) всплески амплитуды. Имели место следующие соотношения: $f_3 \approx 2,034 f_2$ и $f_4 \approx 4,162 f_2$.

На рис. 4 приведены два характерных спектра сигналов акселерометра. По оси абсцисс откладывали частоту вибраций, а по оси ординат — величину выходного напряжения усилителя акселерометра. Амплитуда вибраций была прямо пропорциональна величине выходного напряжения. Из приведенных спектров следует, что при режимах обработки $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ мм/об доминирующие частоты вибраций, отвечающие всплескам амплитуды, имели следующие значения: $446,2, 902,7, 1359,3, 1629,7, 2762,1, 6211,3$ Гц (см. рис. 4, а), а при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,208$ мм/об — $2763,2, 6212,4$ Гц (см. рис. 4, б).

Анализ спектров сигналов акселерометра показал, что при варьировании величины подачи наиболее существенные изменения претерпевает амплитуда, которая соответствует частоте $902,7 \pm 10,5$ Гц. Поэтому для анализа вибраций, возникающих в процессе обработки, целесообразно выбрать величину амплитуды, соответствующую частоте $902,7 \pm 10,5$ Гц.

При наличии автоколебаний режущего инструмента, возникающих при его взаимодействии с обрабатываемой заготовкой, имеет место их относи-

тельное смещение на уровне десятков микрометров [2]. Это особенно ярко проявляется при рассмотрении микропрофиля обработанной поверхности. На рис. 5 приведены две профилограммы шероховатости обработанных поверхностей, которые характерны для выполняемых исследований. Профилограмма на рис. 5, *a* отличается большими значениями высот микронеровностей (десятки микрометров), что указывает на наличие недопустимых колебательных процессов с точки зрения требований шероховатости. Профилограмма, приведенная на рис. 5, *б*, наоборот, характеризуется незначительными высотами микронеровностей. Очевидно, что процесс точения в этом случае обладает более высокой вибрационной устойчивостью.

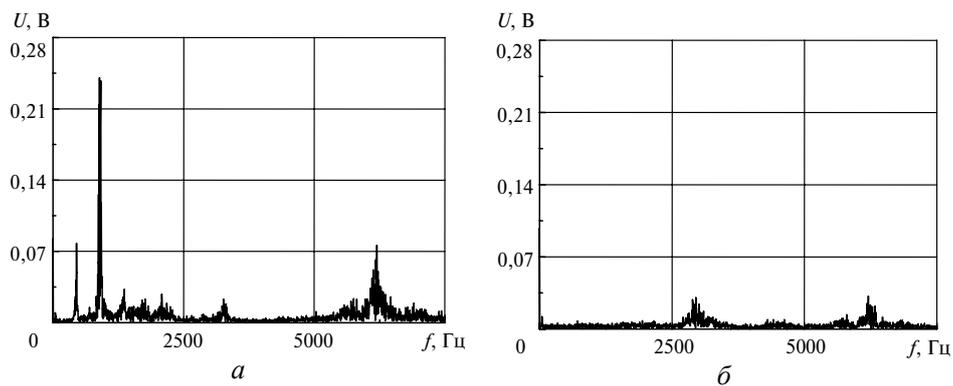


Рис. 4. Спектр амплитуд выходного напряжения акселерометра при режиме обработки: $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ (а), $0,208$ (б) мм/об.

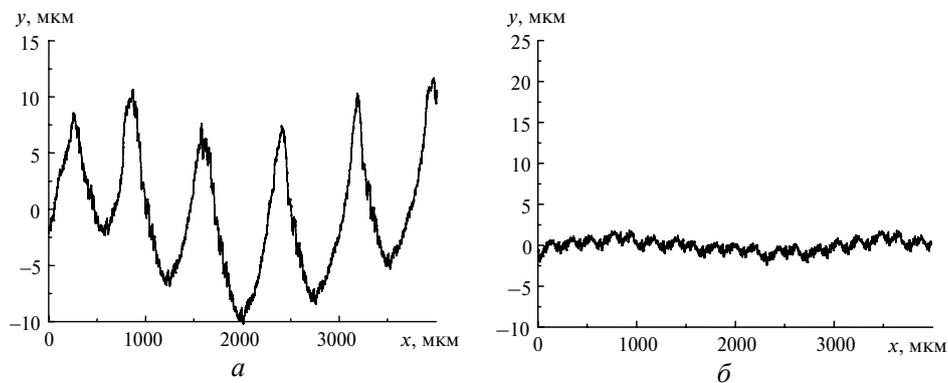


Рис. 5. Профилограммы шероховатости поверхностей, обработанных при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм, $S = 0,125$ м (а), $0,208$ (б) мм/об.

На основании полученных экспериментальных данных (см. рис. 1—5) было установлено влияние подачи на параметры процесса резания, которые характеризуют динамические явления (рис. 6—8).

Анализ влияния подачи на изменение шероховатости поверхности (см. рис. 6, *a*) позволяет ранжировать режимы точения с точки зрения вибрационной устойчивости процесса резания. Наименьшее значение параметра шероховатости Ra , а соответственно и наивысшая вибрационная устойчивость соответствует подаче $0,208$ мм/об. На основании дальнейшего сопоставления величин параметра шероховатости Ra подачи можно расположить в ряд: $0,166, 0,021, 0,042, 0,083, 0,125$ мм/об.

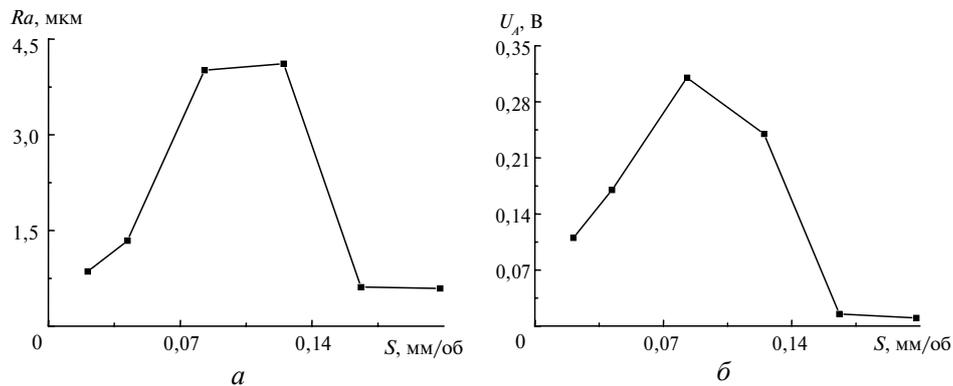


Рис. 6. Влияние подачи на параметр шероховатости Ra обработанной поверхности (а) и амплитуду выходного напряжения акселерометра (б), соответствующую частоте $902,7 \pm 10,5$ Гц при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм.

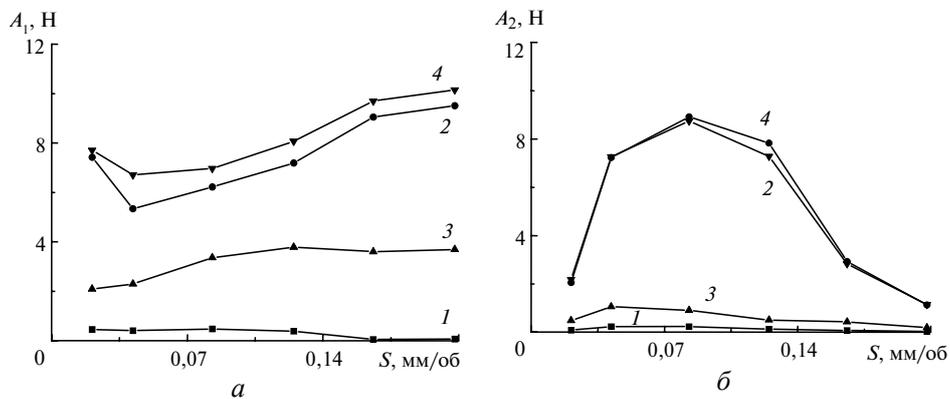


Рис. 7. Влияние подачи на амплитуду составляющих A_x (1), A_y (2), A_z (3) и результирующей A_R (4) силы резания, соответствующую частотам: $f_1 = 4,50 \pm 0,08$ Гц (а) и $f_2 = 11,65 \pm 0,14$ Гц (б) при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм.

Характер изменения амплитуды выходного напряжения акселерометра при частоте $902,7 \pm 10,5$ Гц в зависимости от подачи (см. рис. 6, б) практически повторяет характер изменения параметра шероховатости Ra . Поэтому величину данного параметра можно использовать в качестве оценочной характеристики вибрационной устойчивости процесса резания.

Информация о колебательных процессах содержится в осциллограммах составляющих силы резания. Для установления этой взаимосвязи построены зависимости влияния величины подачи на величину амплитуды составляющих и результирующей силы резания, соответствующих частотам $f_1 = 4,50 \pm 0,08$ Гц (см. рис. 7, а) и $f_2 = 11,65 \pm 0,14$ Гц (см. рис. 7, б). Совместный анализ рис. 6, а и 7 позволяет установить, что между величиной параметра шероховатости поверхности Ra и амплитудой A_2 составляющей силы резания $P_y(t)$ на частоте $f_2 = 11,85 \pm 0,2$ Гц имеется корреляционная связь. Однако характер изменения амплитуды A_2 в зависимости от величины подачи не повторяет характер изменения параметра шероховатости Ra . Поэтому параметр A_2 не целесообразно использовать для оценки вибрационной устойчивости процесса резания. Как было показано выше, колебания составляю-

шей силы резания $P_y(t)$ на частоте f_2 обусловлены эксцентричностью припуска. Учитывая, что во всех опытах величина и форма припуска были примерно одинаковы, можно сделать следующие предположения:

— при $S = 0,083; 0,125$ мм/об неравномерность припуска 0,02 мм инициирует возникновение автоколебаний, амплитуда которых достигает значительных величин;

— при $S = 0,166; 0,208$ мм/об неравномерность припуска 0,02 мм не вызывает колебаний со значительной величиной амплитуды, т. е. имеет место вибрационная устойчивость процесса обработки;

— подачи $S = 0,021; 0,042$ мм/об занимают промежуточное положение, т. е. процесс обработки сопровождается автоколебаниями, амплитуда которых еще не достигла критических значений.

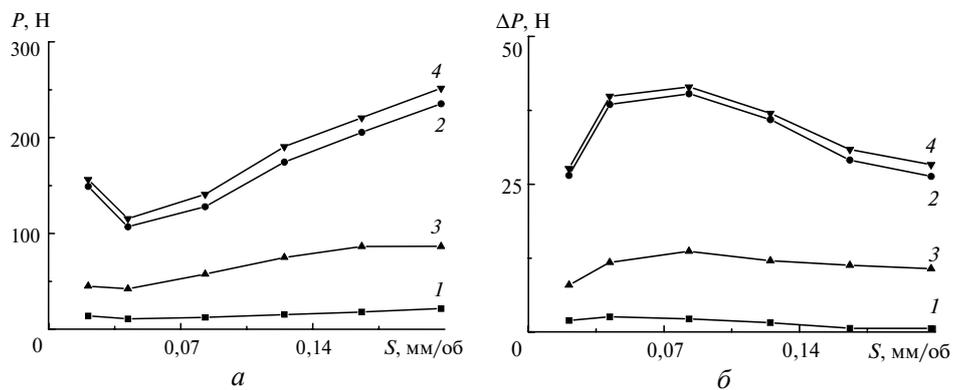


Рис. 8. Влияние подачи на составляющие P_x (1), P_y (2), P_z (3) и результирующую R (4) силы резания (а) и величину изменения ΔP_x (1), ΔP_y (2), ΔP_z (3) и ΔR (4) при $v = 2$ м/с, $t = 0,1$ мм.

Анализ зависимости изменения среднего значения составляющих силы резания (см. рис. 8, а) показал, что при $S = 0,042$ мм/об имеет место минимум силы. Однако в данном случае величина амплитуды автоколебаний и, как следствие, величина шероховатости (см. рис. 6, а) возрастает. С другой стороны, значения составляющих сил резания при $S = 0,166$ и $0,208$ мм/об достигают максимальных значений, а при этом, как выше было показано, обеспечивается наилучшая вибрационная устойчивость процесса резания. Следовательно, величина среднего значения силы резания не оказывает доминирующего влияния на величину амплитуды колебаний.

Анализ рис. 8, б показал, что между величинами диапазонов изменения составляющих силы резания ΔP_x , ΔP_y , ΔP_z и параметром шероховатости Ra существует корреляционная зависимость. Однако характер изменения данных параметров в зависимости от величины подачи не повторяет характер изменения параметра шероховатости Ra , поэтому данные параметры не целесообразно использовать для оценки вибрационной устойчивости процесса резания.

Выводы

При точении закаленной стали ХВГ твердостью $HRC 60-62$ круглыми пластинами из керамического композита кубического нитрида бора $cBN-Si_3N_4$ с постоянной скоростью и глубиной резания в зависимости от величины подачи наблюдали автоколебания различной амплитуды, величина и ха-

раक्टर которых проявляется на профилограммах обработанных поверхностей.

Ранжировать технологические режимы обработки с точки зрения вибрационной устойчивости процесса резания представляется возможным по величине параметра Ra шероховатости обработанной поверхности.

Для достижения вибрационной устойчивости процесса резания закаленной стали ХВГ твердостью HRC 60—62 резцами с круглыми пластинами из композита на основе кубического нитрида бора $cBN-Si_3N_4$ необходимо обеспечить условия резания, при которых величина колебаний силы резания на частоте вращения шпинделя будет минимальна. Данное условие представляется возможным обеспечить при использовании следующих режимов обработки: скорость резания $v = 2$ м/с, глубина резания $t = 0,1$ мм, подача $S = 0,166—0,208$ мм/об.

1. *Жарков И. Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. — 184 с.
2. *Васин С. А.* Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. — М.: Машиностроение, 2006. — 384 с.
3. *Гриценко Э. И., Дальник П. Е., Чапалюк В. П.* Точение никелевых сплавов инструментом из кубического нитрида бора. — Киев: Наук. думка, 1993. — 108 с.
4. *Инструменты из сверхтвердых материалов /* Под ред. Н. В. Новикова. — М.: Машиностроение, 2005. — 555 с.
5. *Клименко С. А., Копейкина М. Ю., Мельничук Ю. А. и др.* Повышение эффективности лезвийного инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ // Сверхтв. материалы. — 2003. — № 5. — С. 76—81.
6. *Петруша І. А., Осіпов О. С., Смірнова Т. І. та ін.* Різальний композит кубічного нітриду бору з низькою модульною добавкою жароміцного нітриду кремнію // Породорозрушаючий і металлообробляючий інструмент — техніка і технологія його изготовления і применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. — Вып. 11. — С. 206—211.
7. *Девин Л. Н.* Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. — Киев: Наук. думка, 1992. — 131 с.
8. *Машиностроительные материалы: Краткий справ. /* Под ред. В. М. Раскатова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
9. *Стахнив Н. Е., Сулима А. Г.* Закономерности изменения силы резания при врезании и выходе инструмента из заготовки при точении силуминов резцами с круглыми АТП // Сверхтв. материалы. — 2009. — № 1. — С. 75—82.
10. *Стахнив Н. Е.* Моделирование силы резания при стационарном точении // Материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. “Качество, стандартизация, контроль: теория и практика”, г. Ялта, 23—26 сент. 2008 г. — Киев: АТМ України, 2008. — С. 123—128.
11. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
12. *Шрюфер Э.* Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов / Под ред. В. П. Бабака. — Киев: Либідь, 1995. — 320 с.

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

Поступила 09.10.08