

Исследование процессов обработки

УДК 621.941

Н. Е. Стахнив (г. Киев)

Исследование влияния режимов резания на шероховатость обработанной поверхности при чистовом точении закаленных сталей резцами из композита на основе КНБ

Приведены результаты исследований процесса чистового точения закаленной стали ХВГ инструментом, оснащенным круглой режущей пластиной из композита на основе кубического нитрида бора (система $cBN-Si_3N_4$). На основании анализа шероховатости обработанной поверхности установлены режимы резания, обеспечивающие стабильные условия взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Ключевые слова: *точение закаленных сталей, круглая режущая пластина, композит на основе КНБ, шероховатость обработанной поверхности.*

Для оснащения лезвийных инструментов в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины разработан композиционный материал на основе кубического нитрида бора с добавкой нитрида кремния cNB/Si_3N_4 [1]. Исследования показали перспективность его использования в инструменте при чистовом точении закаленных сталей [2–4]. Шероховатость обработанной поверхности оценивали по параметру Ra [2, 4], но такой оценки недостаточно. Геометрический профиль обработанной поверхности (шероховатость и волнистость) также содержит информацию о процессах, которые имеют место при резании. Движения формообразования, схватывание материала инструмента и детали, появление и исчезновение нароста, износ инструмента, вибрации и автоколебания непосредственно формируют микропрофиль обработанной поверхности [5, 6].

Для различных видов обработки шероховатость обработанной поверхности представляют в виде двух составляющих – детерминированной, описываемой некоторой периодической функцией, и случайной [6]. Детерминированная составляющая, как правило, обусловлена движением формообразования и геометрической формой рабочего участка режущего инструмента. Предложены различные математические модели, которые позволяют рассчи-

тать параметры детерминированной составляющей [5, 6]. Что касается случайной составляющей, то теоретически прогнозировать ее величину проблематично, но именно в ней содержится информация об износе инструмента, случайных смещениях инструмента относительно детали, а также других случайных воздействиях на микропрофиль обрабатываемой поверхности в процессе его формообразования.

Цель данной работы – исследование микропрофиля обработанной поверхности при чистовом точении закаленных сталей резцами с круглыми режущими пластинами из композита cBN/Si₃N₄ при различных режимах и условиях обработки, а также определение технологических режимов, при которых достигаются наиболее стабильные условия взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования выполняли на автоматизированном стенде, на базе токарного станка с ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [7], при чистовом точении заготовок из закаленной стали ХВГ твердостью 59–60 HRC. Резец с механическим креплением круглой режущей пластины RNMN070300Т из ПСТМ cBN/Si₃N₄ имел передний угол $\gamma = -10^\circ$ и задний угол $\alpha = 10^\circ$. Режимы резания изменяли в широком диапазоне: подача $S = 20\text{--}250$ мкм/об, скорость резания $v = 1,0\text{--}3,5$ м/с, глубина резания $t = 0,1$ мм. Изменение технологических режимов обуславливало как отсутствие автоколебаний, так и наличие автоколебаний с различными величинами амплитуд. Составляющие силы резания P_x , P_y и P_z измеряли с помощью динамометра УДМ-100. Акселерометр (датчик KD-35 фирмы ММФ, Германия) использовали для преобразования механических колебаний резца в электрические сигналы, пропорциональные ускорению колеблющегося инструмента. Сигналы от динамометра по трем каналам и от акселерометра поступали на АЦП ADA-1406. Частота опроса составляла 85 кГц. Управление АЦП ADA-1406 и обработку информации проводили при помощи пакета Power Graph. Определяли спектр сигнала акселерометра, на основании анализа которого устанавливали наличие или отсутствие автоколебаний при резании. Для исследования шероховатости обработанной поверхности применяли аналоговый прибор Surtronic-3 фирмы “Renk Teylor Hobson” (Великобритания), который был посредством АЦП соединен с ПК.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В связи с непрерывным изменением формы режущего инструмента и случайным воздействием ряда факторов неровности на обработанной поверхности располагаются нерегулярно. Именно из-за нерегулярности шероховатости необходимо применять для ее описания и анализа теоретико-вероятностный подход [6, 8]. На основании исследований шероховатости обработанной поверхности можно оценить особенности взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого изделия в зоне резания. Для этого необходимо выполнить сравнительный анализ нормированных автокорреляционных функций шероховатости обработанной поверхности и ее “теоретического профиля”.

Рассмотрим идеальный случай токарной обработки при постоянной подаче суппорта на оборот детали и неизменной форме режущей кромки резца. В этом случае на поверхности детали формируется “идеальный профиль”. Например, при обработке резцом, оснащенном круглой режущей пластиной

радиуса $r = 3,5$ мм, с подачей на оборот $S = 240$ мкм/об “идеальный профиль” представляет собой периодическую функцию, состоящую из ряда дуг, расположенных с периодом $T_x = 240$ мкм (рис. 1, *a*). Для данного “идеального профиля” на рис. 1, *б* приведена нормированная автокорреляционная функция, которая также является периодической с таким же периодом T_x , равным подаче на оборот S .

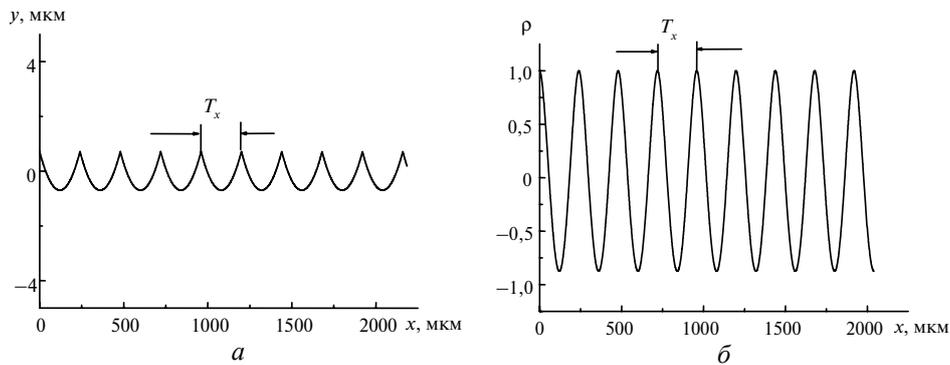


Рис. 1 “Идеальный профиль” поверхности для инструмента с круглой режущей пластиной (*a*) и соответствующая ей нормированная автокорреляционная функция (*б*); $T_x = 240$ мкм.

На рис 2, *a* представлена шероховатость (кривая 1) и волнистость (кривая 2) поверхности, обработанной резцом с радиусом режущей кромки $r = 3,5$ мм при $S = 240$ мкм/об, $t = 0,1$ мм, $v = 2,2$ м/с и величине износа резца $h_3 = 0,22$ мм. Нормированная автокорреляционная функция данной шероховатости представлена на рис. 2, *б*. Ее анализ позволяет сделать следующие два вывода:

1. Наличие на кривой нормированной автокорреляционной функции пиков с регулярно повторяющимися периодами указывает, что исходный микропрофиль поверхности (см. рис. 2, *a*) на фоне случайных изменений содержит периодическую детерминированную функцию. Причем период детерминированной функции T_x численно равен подаче на один оборот – 240 мкм (см. рис. 2, *б*). При данных режимах и условиях резания доминирующее влияние на микропрофиль обработанной поверхности оказывало движение формообразования (подача на оборот) и профиль проекции режущей кромки на основную плоскость инструмента.

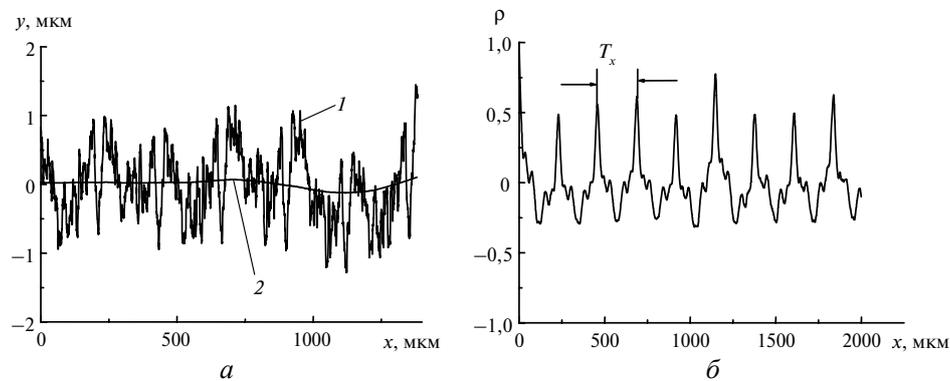


Рис. 2. Шероховатость (1) и волнистость (2) обработанной поверхности (*a*) и соответствующая нормированная автокорреляционная функция (*б*); $T_x = 240$ мкм.

2. Геометрическая форма нормированной автокорреляционной функции в пределах периода T_x с течением времени изменялась незначительно. В пределах участка поверхности, на котором выполняли измерение шероховатости, можно пренебречь влиянием изменения формы инструмента вследствие его непрерывного износа.

Указанное обстоятельство позволяет рассчитать детерминированную функцию шероховатости обработанной поверхности, которая выше названа “теоретическим профилем”. Для этого на профилограмме шероховатости поверхности (см. рис. 2, *a*) выделена одна из впадин, которая образована изношенным инструментом (рис. 3, кривая 1) и показана ее проекция на основную плоскость режущей кромки неизношенного инструмента (рис. 3, кривая 2). Впадина на профилограмме периодически повторяется и, с некоторой погрешностью, соответствует этому профилю. Сопоставив выбранные впадины между собой, можно оценить погрешность. Установлено, что величина несовпадения впадин не превышает 0,4 мкм. Следовательно, можно утверждать, что профиль, представленный на рис. 3, с погрешностью равной 0,4 мкм соответствует профилю проекции режущей кромки на основную плоскость инструмента.

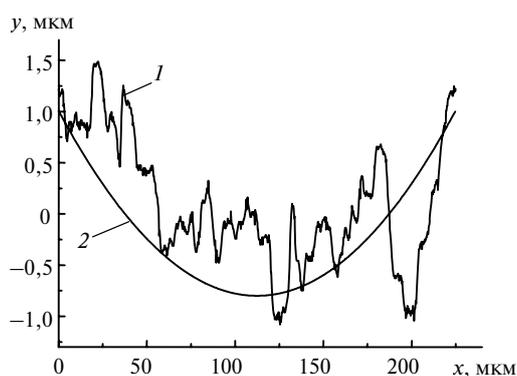


Рис. 3. Впадина, образованная изношенным инструментом (1) и ее проекция на основную плоскость режущей кромки неизношенного инструмента (2).

Рассмотрим токарную обработку при постоянной подаче на оборот детали резцом с проекцией режущей кромки на основную плоскость, соответствующей кривой 1 на рис. 3, и при отсутствии воздействия на процесс формообразования других факторов. В этом случае на поверхности детали формируется “теоретический профиль” (рис. 4, *a*), представляющей собой периодическую функцию, состоящую из ряда участков (см. рис. 3, кривая 1) с периодом $T_x = 240$ мкм. Для данного “теоретического профиля” на рис. 4, *б* приведена нормированная автокорреляционная функция, которая также является периодической с периодом T_x .

Сравнение нормированных автокорреляционных функций фактической шероховатости (см. рис. 2, *б*) и “теоретического профиля” (см. рис. 4, *б*) показало, что при их внешнем сходстве имеются некоторые отличия. Можно предположить, что они обусловлены воздействием различных случайных факторов в зоне взаимодействия резца и обрабатываемой детали. Исследуя эти отличия, можно провести численную оценку воздействия случайных факторов на процесс формообразования, т. е. оценить нестабильность условий взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием. Для этого сопоставили нормированные автокорреляционные функции фактической шерохо-

ватости (рис. 5, кривая 2) и соответствующего “теоретического профиля” (рис. 5, кривая 1). Для оценки использовали параметр H , равный наибольшей разнице между рассматриваемыми нормированными автокорреляционными функциями, который позволяет оценить величину нестабильности взаимодействия резца с обрабатываемым изделием. Чем больше значение H , тем больше изменяются условия взаимодействия инструмента и обрабатываемого изделия в зоне резания. Для благоприятного формообразования предпочтительными являются условия обработки, которым соответствует минимальная величина H .

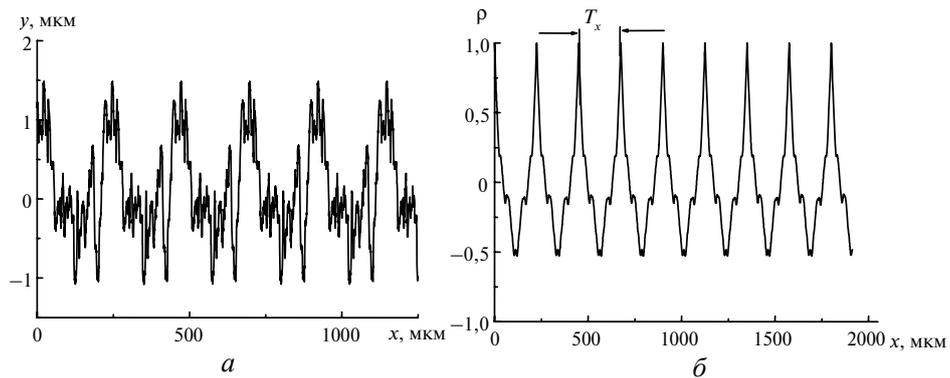


Рис. 4. “Теоретический профиль” поверхности (а) и соответствующая ему нормированная автокорреляционная функция (б); $T_x = 240$ мкм.

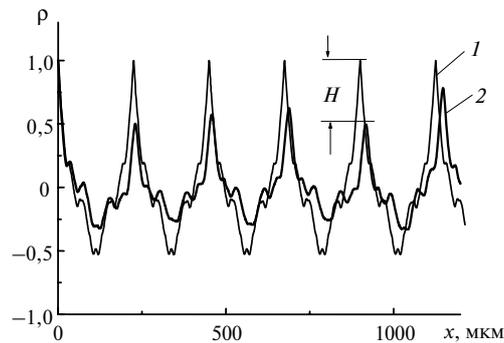


Рис. 5. Нормированные автокорреляционные функции фактической шероховатости (2) и соответствующего ей “теоретического профиля” (1).

Нормированная автокорреляционная функция шероховатости является важной функциональной зависимостью, которая позволяет охарактеризовать детерминированные и случайные воздействия на процесс резания. Для этого выполняются два этапа исследований шероховатости обработанной поверхности.

На первом этапе сравнивали период нормированной автокорреляционной функции с величиной подачи на оборот. Если эти величины не совпадали, то предполагали, что на процесс формирования шероховатости поверхности подача на оборот не оказывала доминирующего влияния. Для выявления доминирующих процессов, проводили дополнительные исследования. Допускали, что основной причиной этого несоответствия являются автоколебания, возникающие в процессе резания [2]. Если период нормированной автокорреляционной функции шероховатости обработанной поверхности совпа-

дает с величиной подачи на оборот, то считали, что на процесс образование шероховатости поверхности доминирующее влияние оказывает подача на оборот. При этом инструмент повторяет свою режущую кромку, оставляя контур на поверхности обработанной детали, и эту информацию можно получить из профилограммы шероховатости поверхности.

На втором этапе рассчитывали “теоретический профиль” (см. рис. 4) и соответствующую ему нормированную автокорреляционную функцию. Затем сопоставляли нормированные автокорреляционные функции фактической шероховатости и “теоретического профиля” (см. рис. 5), определяли параметр H , оценивающий влияние случайных факторов на процесс образования шероховатости поверхности.

Режимы резания, при которых параметр H достигает минимального значения, обуславливают минимальную нестабильность взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым изделием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 6 приведены характерные профилограммы обработанной поверхности, полученные при чистовом точении закаленных сталей резцом с круглой режущей пластиной из композита cBN/Si₃N₄, со скоростью резания $v = 2,0$ м/с и с различной величиной подачи на оборот.

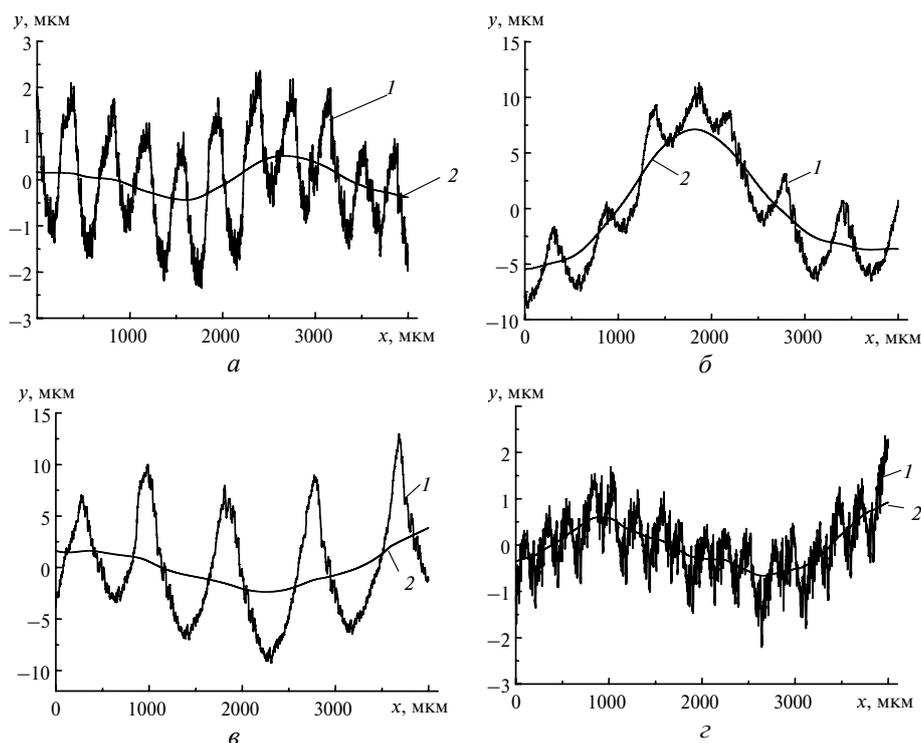


Рис. 6. Микропрофиль (1) и волнистость (2) поверхности, обработанной при подаче $S = 20$ (а), 80 (б), 130 (в), 240 (г) мкм/об.

Для данных профилограмм путем математического усреднения [6] выделяли волнистость (см. рис. 6, кривая 2) и шероховатость поверхности (рис. 7). Для шероховатости были рассчитаны нормированные автокорреляционные функции (рис. 8).

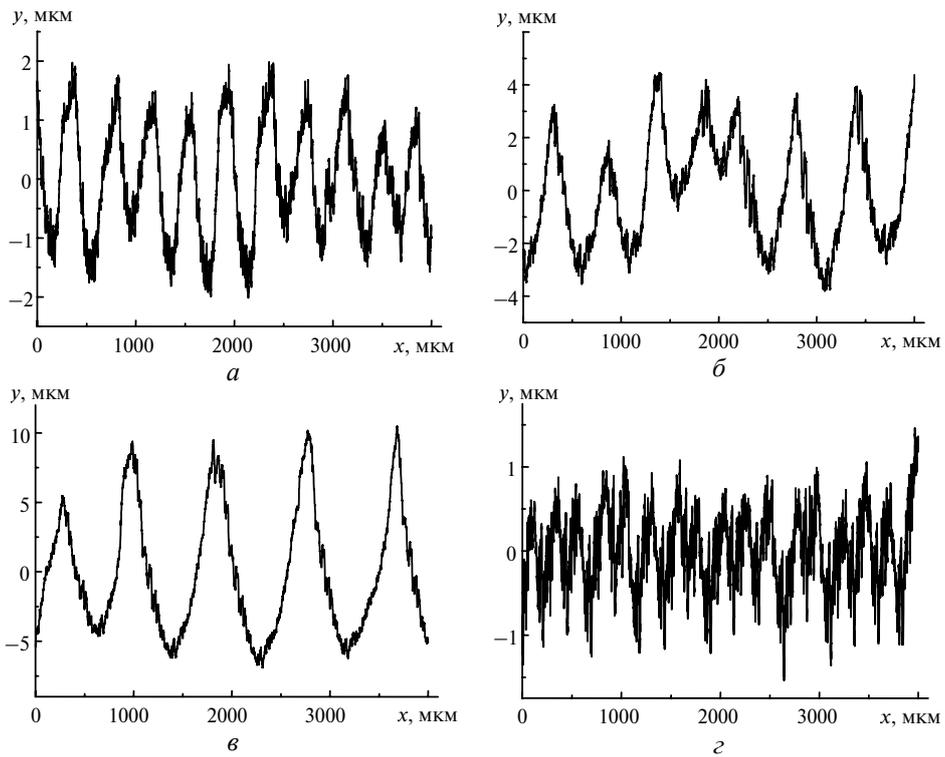


Рис. 7. Шероховатость поверхности, обработанной при подаче $S = 20$ (а), 80 (б), 130 (в), 240 (г) мкм/об.

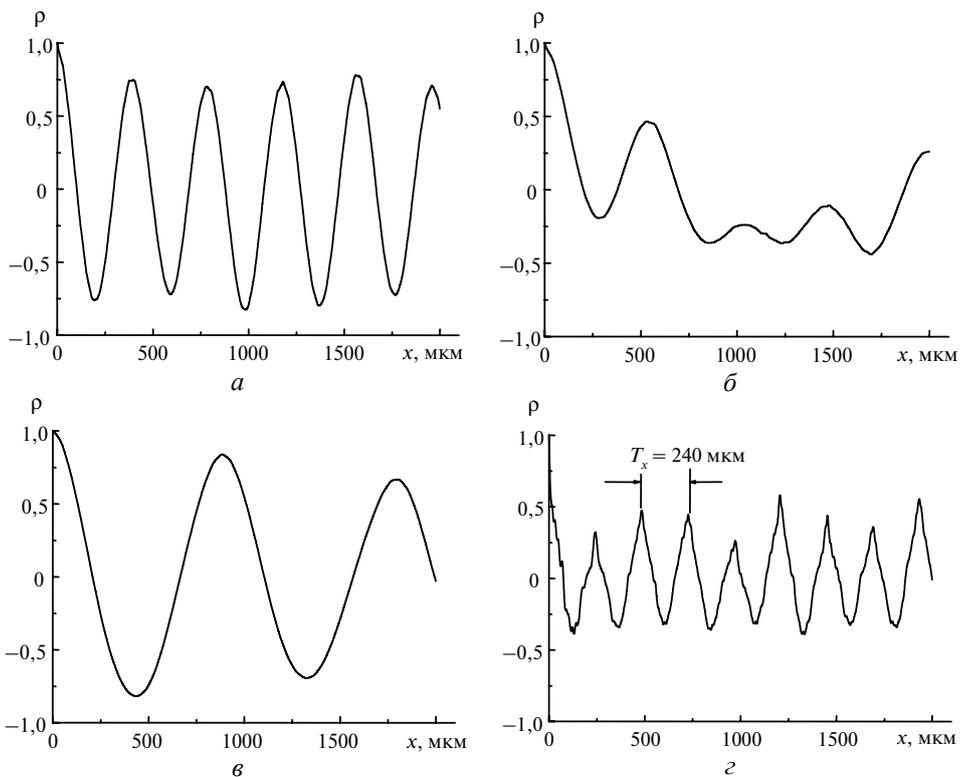


Рис. 8. Нормированные автокорреляционные функции шероховатости поверхности, обработанной при подаче $S = 20$ (а), 80 (б), 130 (в), 240 (г) мкм/об; $T_x = 240$ мкм.

На основании анализа полученных микропрофилей поверхности (см. рис. 7) и соответствующих им нормированных автокорреляционных функций (см. рис. 8) были построены композиционные модели [6], каждая из которых включает детерминированную и случайную составляющие. Детерминированная составляющая представляла собой периодическую функцию, периоды которой при подачах $S = 20, 80, 130$ мкм/об не совпадали с подачами на оборот. В этих случаях детерминированные составляющие обусловлены движением вершины резца вследствие его автоколебаний, что было подтверждено при исследовании спектра сигнала акселерометра. На спектре наблюдали всплески амплитуд на частотах 460 и 910 Гц (рис. 9, *a–в*), что указывало на наличие автоколебаний [2]. Уравнения, которые описывают движение вершины резца во время автоколебаний, представлены в [9, 10].

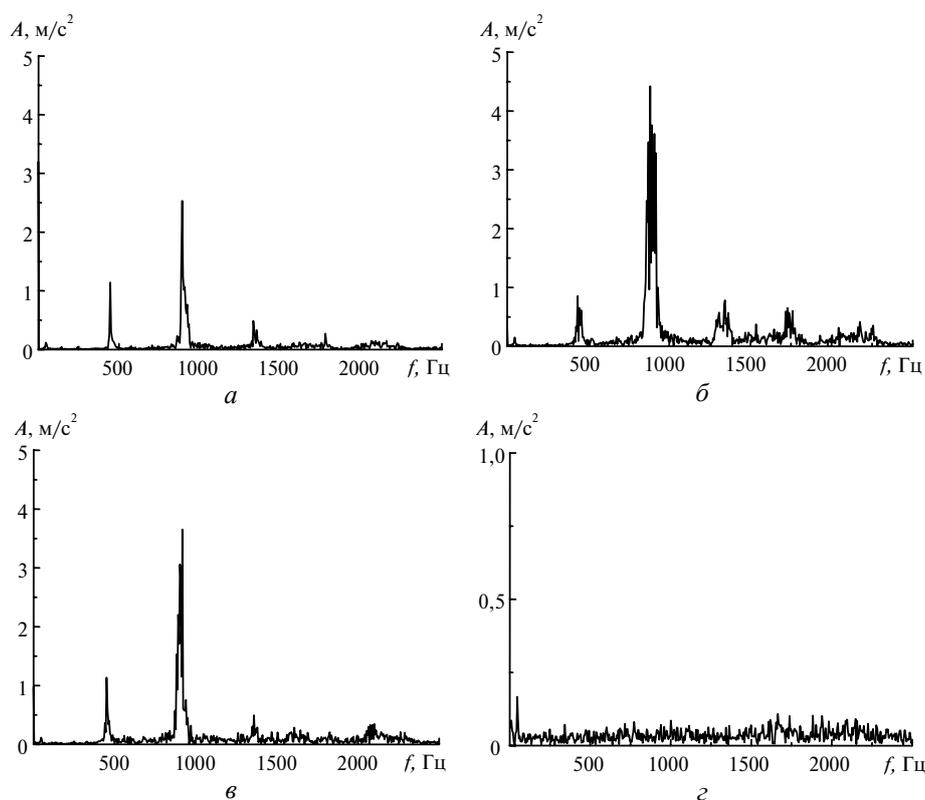


Рис. 9. Спектр сигнала акселерометра в процессе резания при подаче $S = 20$ (*a*), 80 (*б*), 130 (*в*), 240 (*г*) мкм/об.

Только в одном случае, который соответствовал обработке с подачей $S = 240$ мкм/об, автоколебания отсутствовали (см. рис. 9, *г*) и период детерминированной функции совпал с величиной подачи на оборот (см. рис. 8, *г*). Последнее обстоятельство указывало, что детерминированная составляющая композиционной модели шероховатости обусловлена величиной подачи на оборот и проекцией профиля режущей кромки резца на основную плоскость. При обработке с подачей $S = 240$ мкм/об не только отсутствовали автоколебания, но и была достигнута шероховатость обрабатываемой поверхности с наименьшим параметром $Ra = 0,74 \pm 0,05$ мкм (см. рис. 7, *г*). При наличии автоколебаний параметр Ra принимал значения $1,61 \pm 0,35$ (см. рис. 7, *a*),

3,14±0,54 (см. рис. 7, б), 4,43±0,64 (см. рис. 7, в) мкм, т.е. автоколебания обуславливают более высокие величины значений параметра Ra .

Исследование влияния величины подачи на шероховатость обработанной поверхности показали, что для принятых условий обработки автоколебания резца наблюдали при подачах $S < 190$ мкм/об. Если величина подачи находилась в диапазоне 190–200 мкм/об, то появления и исчезновение автоколебаний носило случайный характер. При величине подачи $S > 200$ мкм/об автоколебания не наблюдали, а шероховатость обработанной поверхности формировалась при доминирующем влиянии подачи на оборот и проекции профиля режущей кромки резца на основную плоскость.

На рис. 10 приведены нормированные автокорреляционные функции шероховатости поверхностей, полученные с различной величиной скорости резания при постоянной глубине резания $t = 0,1$ мм и подаче на оборот $S = 230$ мкм/об.

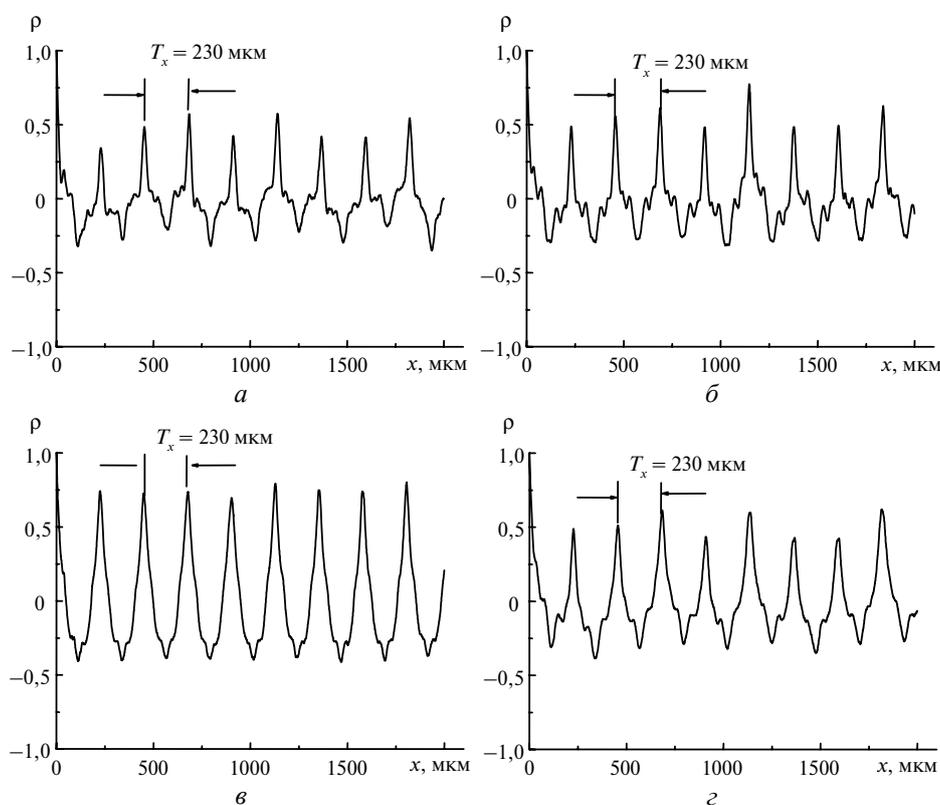


Рис. 10. Нормированные автокорреляционные функции шероховатости поверхности, обработанной при скорости резания $v = 2,0$ (а), 2,5 (б), 3,0 (в), 3,5 (г) м/с; $T_x = 230$ мкм.

Как следует из рис. 10, при подаче $S = 230$ мкм/об при всех скоростях резания формируется шероховатость обработанной поверхности, близкая к “теоретическому профилю”. Наиболее предпочтительной была скорость резания $v = 3,0$ м/с, так как при этом отличие нормированных автокорреляционных функций шероховатости поверхности и “теоретического профиля” минимально (таблица).

Как следует из таблицы, обработка с подачей $S = 210$ –250 мкм/об и со скоростью резания $v = 2,5$ –3,0 м/с наиболее предпочтительна, так как обеспе-

чивается получение параметра H в пределах 0,25–0,49. Минимальное значение параметра $H = 0,25$ достигается при $S = 230$ мм/об, $v = 3,0$ м/с.

Значение параметра H в зависимости от подачи и скорости резания

S, мкм/об	Параметр H при v , м/с					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
210	0,64	0,59	0,55	0,49	0,39	0,57
230	0,62	0,60	0,54	0,49	0,25	0,58
250	0,65	0,59	0,54	0,48	0,34	0,58

ВЫВОДЫ

При чистовом точении закаленной стали ХВГ резцами с круглыми режущими пластинами RNMN070300T из ПСТМ cBN/Si₃N₄ с постоянной глубиной резания при подачах $S < 190$ мм/об возникают автоколебания, что обуславливает несовпадение периода нормированной автокорреляционной функции шероховатости обработанной поверхности с подачей на оборот.

При подаче $S > 200$ мм/об автоколебания при резании отсутствуют, а на шероховатость обработанной поверхности доминирующее влияние оказывает подача на оборот и проекция профиля режущей кромки резца на основную плоскость.

Минимальная величина нестабильности взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого изделия в процессе резания имеет место при $S = 230$ мм/об, $v = 3,0$ м/с. Указанные режимы обработки являются наиболее благоприятными с точки зрения процесса образования шероховатости обработанной поверхности.

Характер изменения нормированной автокорреляционной функции шероховатости обработанной поверхности позволяет выявить доминирующие факторы, влияющие на процесс формообразования при точении.

При доминирующем влиянии на шероховатость обработанной поверхности формообразующих движений период нормированной автокорреляционной функции шероховатости совпадает с величиной подачи суппорта на оборот детали. При этом значение нестабильности взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым изделием в процессе резания можно определить путем сопоставления нормированной автокорреляционной функции шероховатости обработанной поверхности с нормированной автокорреляционной функцией “теоретического профиля”.

Наведено результати дослідження процесу чистового точіння загартованої сталі ХВГ інструментом, що оснащено круглою ріжучою пластиною із композиту на основі кубічного нітриду бору (система cBN–Si₃N₄). На основі аналізу шорсткості обробленої поверхні встановлено режими різання, що забезпечують стабільні умови взаємодії ріжучого інструменту з оброблюваною заготовкою.

Ключеві слова: *точіння загартованих сталей, круга ріжуча пластина, композит на основі КНБ, шорсткість обробленої поверхні.*

The study results of the hardened steels fine turning by tools tipped with round cutting inserts made from composite on the cBN base (system cBN–Si₃N₄) are given. The most favourable modes of cutting were defined, providing stable conditions of the cutting tool interacting with machined blank.

Keywords: *turning of the hardened steels, round cutting insert, composite on the cBN base, roughness of the processed surface.*

1. *Петруша І. А., Осипов О. С., Смирнова Т. І. та ін.* Різальний композит кубічного нітриду бору з низькомодульною добавкою жароміцного нітриду кремнію // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления.* – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 206–212.
2. *Стахнив Н. Е., Девин Л. Н., Петруша І. А., Осипов О. С.* Динамические явления при чистовом точении закаленных сталей инструментом из композита на основе КНБ // *Сверхтв. материалы.* – 2009. – № 3. – С. 75–83.
3. *Стахнив Н. Е., Девин Л. Н.* Исследование износа круглых режущих пластин из композита на основе КНБ и его влияния на силы резания при чистовом точении закаленных сталей // *Там же.* – 2011. – № 2. – С. 77–85.
4. *Стахнив Н. Е., Девин Л. Н.* Исследование влияния износа инструмента с композитом на основе КНБ на вибрации при чистовом точении закаленных сталей // *Там же.* – 2012. – № 3. – С. 62–69.
5. *Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. и др.* Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.
6. *Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А.* Шероховатость поверхности. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
7. *Девин Л. Н.* Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – Киев: Наук. думка, 1992. – 131 с.
8. *Вентцель Е. С.* Теория вероятности. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
9. *Лазарев Г. С.* Автоколебания при резании металлов. – М.: Высшая школа, 1971. – 243 с.
10. *Жарков И. Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

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

Поступила 14.05.12