

УДК 621.941

**Л. Н. Девин*, Н. Е. Стахнив, А. С. Антонюк, С. В. Рычев,
В. Н. Нечипоренко**

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина

**ldevin@ism.kiev.ua*

Влияние скорости резания на температуру и силы резания при чистовом точении титанового сплава BT1-0 резцом с алмазно- твердосплавной пластиной

Установлены закономерности изменения температуры, силы резания и шероховатости обработанной поверхности в зависимости от скорости резания при чистовом точении титанового сплава BT1-0 резцом с алмазно-твердосплавной пластиной. Обоснованы оптимальные режимы резания.

Ключевые слова: *точение, титановый сплав, алмазно-твердосплавная пластина, температура резания, сила резания, шероховатость.*

Титановые сплавы широко используют в машиностроении для изготовления ответственных узлов механизмов, а также в медицине. Это обусловлено их высокими физико-механическими свойствами в сравнении с другими конструкционными материалами. Основные преимущества титановых сплавов – высокие удельная прочность, коррозионная стойкость в агрессивных средах и температура плавления, низкий коэффициент температурного расширения, биологическая инертность [1]. Применение деталей из титановых сплавов способствует повышению коэффициента полезного действия современных машин, увеличивает их надежность.

Однако плохая обрабатываемость сплавов на основе титана резанием является главным препятствием для их использования.

Поскольку титановые сплавы обладают в 3–10 раз меньшей теплопроводностью, чем алюминиевые, железоуглеродистые и никелевые сплавы [2], в зоне контакта инструмент–деталь при точении происходит большая концентрация теплоты. Титановые сплавы по сравнению с другими обрабатываемыми материалами обладают большим коэффициентом трения [2], что способствует увеличению силы резания [3]. Большой коэффициент трения и низкая теплопроводность способствуют росту температуры в зоне резания [4]. Вы-

сокая температура резания приводит к образованию твердых оксидов и нитридов титана в зоне контакта резца и заготовки, что приводит к быстрому износу инструмента.

Таким образом, оптимизация режимов обработки титановых сплавов в целях повышения работоспособности резцов из сверхтвердых материалов при точении является актуальной научно-технической задачей. Из-за сложности явлений, обусловленных высокой адгезионно-химической активностью, низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом трения, процесс точения деталей из сплавов на основе титана изучен недостаточно полно.

При исследовании процесса точения различных материалов основополагающими являются знания закономерностей изменения действующих сил и температур, от которых зависит характер физико-химических явлений, протекающих на взаимодействующих поверхностях инструмента и обрабатываемого металла. В свою очередь, эти процессы оказывают влияние на действующие силы, износ инструмента и качество обработанной поверхности деталей [5].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния режимов на температуру и силу резания при чистовом точении титанового сплава BT1-0 резцом с круглой алмазно-твердосплавной пластиной (АТП).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Точение титанового сплава BT1-0 выполняли на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ с изменением скорости вращения шпинделя главного привода от 120 до 1800 об/мин при подачах 0,05 и 0,1 мм/об. Глубина резания $t = 0,1$ мм. В качестве инструмента использовали сборной проходной резец, оснащенный механически закрепленной круглой пластиной АТП (диаметром 7 мм) на подложке из твердого сплава ВК15. Геометрия режущей кромки: передний угол – 0° , задний угол – 10° .

Для измерения температуры и составляющих силы резания использовали автоматизированную систему исследования процесса точения [6] (рис. 1, а). Для измерения составляющих силы резания использовали универсальный динамометр УДМ–100 конструкции ВНИИИ (Россия), а для измерения температуры резания в державку была встроена хромель-алюмелевая термопара, контактирующая с режущей вставкой. Сигналы с динамометра и термопары усиливались усилителями и через АЦП ADA 1406 фирмы “HOLIT DataSystems”, Украина, поступали на персональный компьютер [7]. Управление АЦП, регистрацию и предварительную обработку экспериментальных данных выполняли с помощью программы PowerGraph [7]. Для каждого эксперимента записывали составляющие силы резания P_x , P_y и P_z , рассчитывали равнодействующую R и проводили обработку исходных данных, которая включала коррекцию данных, корреляционный и спектральный анализ, аппроксимацию тригонометрическими рядами Фурье. Для исследования шероховатости обработанной поверхности применяли прибор Surtronic-3 фирма “Renk Taylor Hobson”, Великобритания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование температуры в зоне резания

Для измерения температуры резания в державку была встроена хромель-алюмелевая термопара, контактирующая с режущей вставкой. Для градуировки термопары был разработан специальный стенд (см. рис. 1, б), который

обеспечивал нагрев вершины резца, до температур, которые возникают в зоне резания.

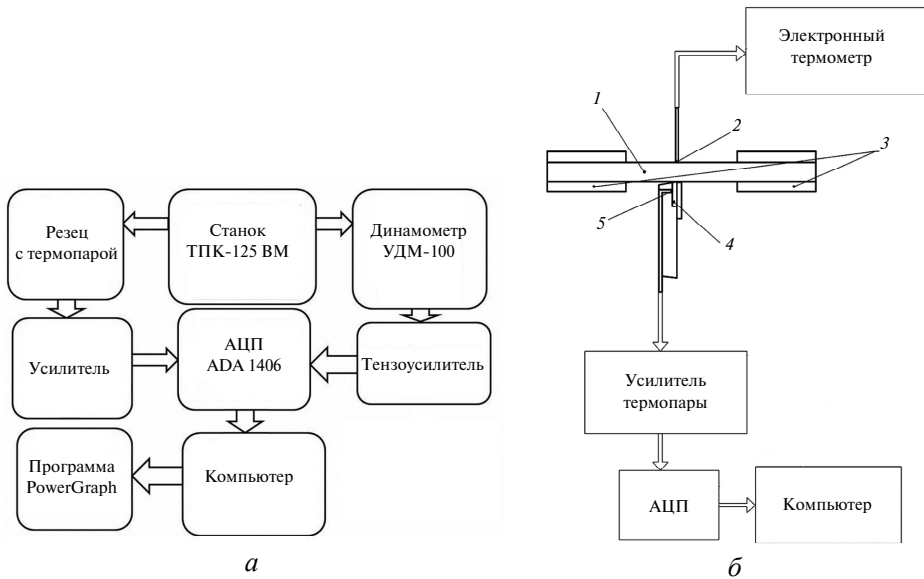


Рис. 1. Блок-схемы автоматизированной системы исследования процесса точения (а) и стенда для градуировки термопары (б): медная пластина (1), контрольная термопара (2), электронагреватель (3), резец (4), термопара (5).

Стенд для градуировки термопары состоял из медной пластины толщиной 8 мм, с одной стороны которой была зачеканена контрольная термопара, соединенная с электронным термометром, а с другой стороны располагали вершину резца. По краям медной пластины симметрично были установлены два электронагревателя.

Температуру нагрева медной пластины от 200 до 800 °С обеспечивали за счет регулировки напряжения трансформатора. Измерение температуры медной пластины выполняли термопарой электронного термометра ТМ-902С (–50–1300 °С). Напряжение задавали таким образом, чтобы стабильно в течение не менее 60 с обеспечить заданную температуру $T_{\text{нагр}}$ медной пластины.

Когда эта температура стабилизировалась, к медной пластине прижимали резец со встроенной термопарой. Сигнал от термопары, пропорциональный температуре $T_{\text{терм}}$, через усилитель посредством аналого-цифрового преобразователя записывали с помощью компьютера.

Полученные зависимости показаний термопары $T_{\text{терм}}(\tau)$ под режущей вставкой резца от времени контакта τ показаны на рис. 2. Видно, что наиболее интенсивно изменение температуры под режущей пластиной происходит в течение 10 с после контакта вершины резца с медной пластиной.

В дальнейшем учитывали значения показаний термопары на десятой секунде. В результате выполненной градуировки и обработки экспериментальных данных была установлена аппроксимационная зависимость, которая позволила установить связь между температурой термопары $T_{\text{терм}(10)}$ на десятой секунде и температурой нагревателя $T_{\text{нагр}}$:

$$T_{\text{нагр}} = \frac{-4 + \sqrt{16 - 23(13,95 - T_{\text{терм}(10)})}}{0,115}. \quad (1)$$

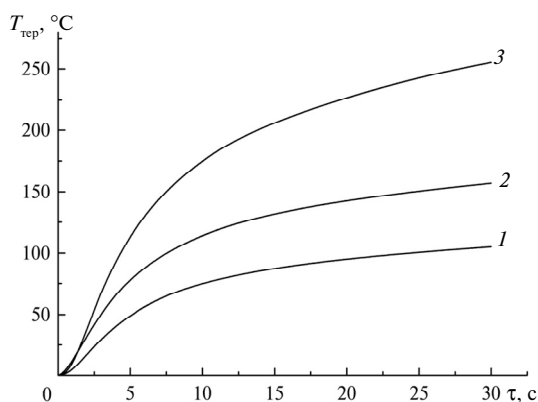


Рис. 2. Зависимость показаний термопары $T_{\text{терм}}$ от времени контакта τ при температурах нагрева медной пластины $T_{\text{нагр}} = 300$ (1), 400 (2), 500 (3).

Установленная при градуировке зависимость (1) позволяет при резании проводить определение температуры в зоне резания. Для этого в процессе обработки записывали, как изменяется температура термопары. На рис. 3 приведены зависимости изменения температуры термопары под режущей пластиной в зависимости от времени обработки τ при разной скорости резания.

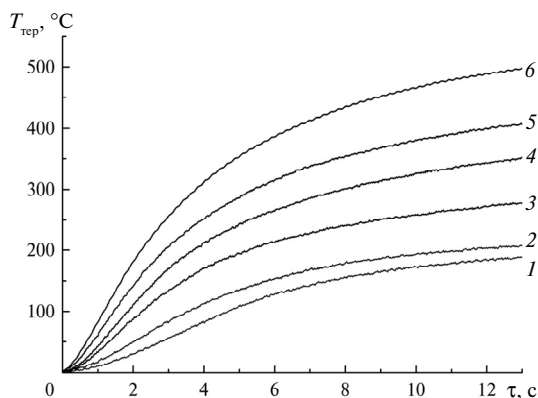


Рис. 3. Зависимость изменения температуры термопары $T_{\text{терм}}$ резца от времени обработки τ для скорости резания $v = 0,7$ (1), 0,9 (2), 1,5 (3), 2,2 (4), 2,9 (5), 4,4 (6) м/с при точении с подачей $S = 0,05$ мм/об.

По полученным зависимостям (см. рис. 3) определяли значения температуры на десятой секунде. В дальнейшем эти величины подставляли в формулу (1) для определения температуры в зоне резания.

На рис. 4 приведены зависимости влияния скорости v на температуру T в зоне резания при подаче $S = 0,05$ и 0,1 мм/об.

Из анализа полученных зависимостей (см. рис. 4) следует, что при увеличении скорости резания v температура в зоне резания $T_{\text{рез}}$ нелинейно увеличивается; при одинаковых скоростях резания при подаче $S = 0,1$ мм/об температура в зоне резания $T_{\text{рез}}$ на 4–6 град выше, чем при подаче $S = 0,05$ мм/об; при увеличении скорости резания $v > 1,5$ м/с температура в зоне резания превышает 700 °С. При таких температурах происходит взаимодействие титана с кислородом и азотом воздуха, что, в свою очередь, обуславливает образования оксидов и нитридов титана [1].

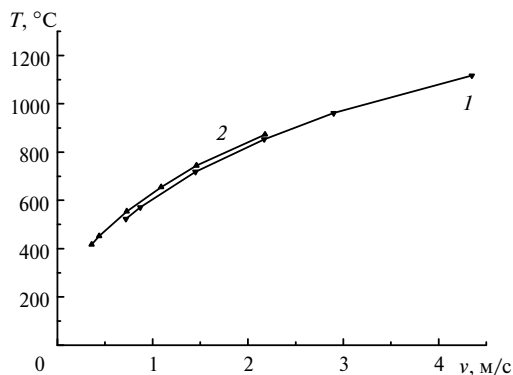


Рис. 4. Зависимость изменения температуры резания $T_{рез}$ от скорости резания v при подаче $S = 0,05$ (1) и $0,1$ (2) мм/об.

Образования оксидов и нитридов титана происходит не только на обработанной поверхности, но также в слое неснятого припуска, который будет срезаться на последующем обороте заготовки. Вследствие этого явления следует ожидать изменения сил резания.

Исследование силы резания

В зависимости от характера изменения площади поперечного сечения среза [8] различают три участка резания: врезание инструмента в заготовку, установившийся процесс и выход инструмента из детали. При установившемся резании имеет место постоянство среднего значения площади поперечного сечения среза, поэтому этот участок является наиболее удобным для исследования силовых характеристик процесса обработки. Но даже на участке установившегося процесса составляющие $P_x(\tau)$, $P_y(\tau)$, $P_z(\tau)$ и равнодействующая $R(\tau)$ представляют собой случайные функции [9], что было учтено при обработке экспериментальных данных. На участке установившегося резания процесс рассматривался как эргодический, что позволило применить корреляционный и спектральный анализы после одного прохода резца [10].

На рис. 5 представлены зависимости средних значений составляющих и равнодействующей R силы резания от скорости резания v .

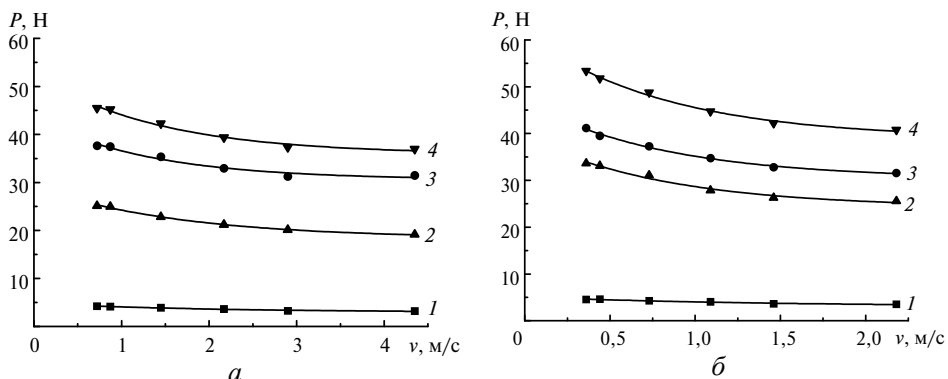


Рис. 5. Изменение средних значений составляющих P_x (1), P_y (2), P_z (3) и равнодействующей силы резания R (4) в зависимости от скорости резания v при точении с подачей $S = 0,05$ (а) и $0,1$ (б) мм/об.

Из анализа кривых на рис. 5 следует, что средние значения составляющих и равнодействующей силы резания убывают при увеличении скорости резания. Наиболее интенсивно убывают составляющие P_y и P_z , а наименее – P_x .

Большому значению подачи соответствуют более высокие значения средних значений составляющих и равнодействующей силы резания.

На рис. 6 приведены зависимости среднеквадратических отклонений (СКО) σ_x , σ_y , σ_z , σ_R составляющих и равнодействующей силы резания от скорости резания v .

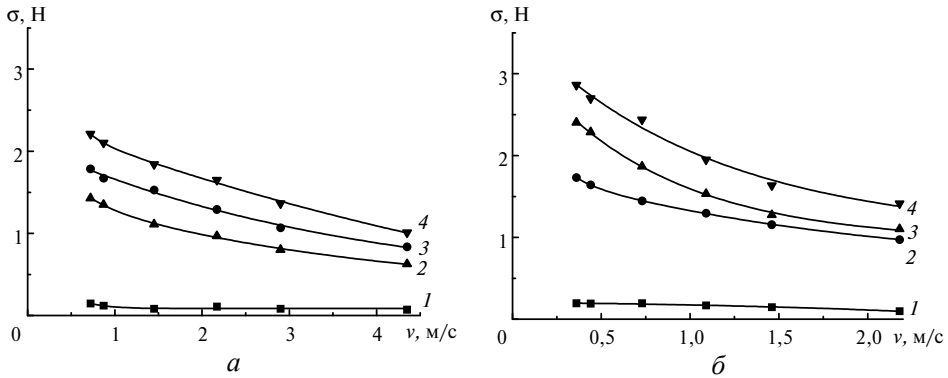


Рис. 6. Изменение СКО σ_x (1), σ_y (2), σ_z (3), σ_R (4) составляющих и равнодействующей силы резания от скорости резания v при точении с подачей $S = 0,05$ (а) и $0,1$ (б) мм/об.

Из анализа рис. 6 следует, что СКО составляющих и равнодействующей силы резания уменьшается с ростом скорости резания. Наиболее интенсивно убывают среднеквадратические составляющие σ_y и σ_z , наименее – σ_x . Большому значению подачи соответствуют более высокие значения СКО составляющих и равнодействующей силы резания, при подаче $S = 0,1$ мм/об $\sigma_z > \sigma_y$, а при подаче $S = 0,05$ мм/об $\sigma_z < \sigma_y$.

Как видно из приведенных зависимостей (см. рис. 5 и 6) при скорости резания $v > 1,5$ м/с средние значения и СКО равнодействующей и составляющих силы резания существенно не изменились. Поэтому температура в зоне резания не оказывает влияние на средние значения и СКО равнодействующей и составляющих силы резания.

Для более глубокого изучения закономерностей изменения составляющих силы резания были выполнены корреляционный и спектральный анализы. На рис. 7 для равнодействующей силы резания R представлены характерные зависимости нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ и нормированной спектральной плотности $q(f_R)$, где f_R – частота колебаний [7].

Установлено, что при скорости резания $v < 1,5$ м/с корреляционная функция имела вид гармонической кривой с постоянной амплитудой, а на кривой спектральной плотности имелся один пик. Следовательно, равнодействующая сила резания изменялась с течением времени в соответствии с гармоническим законом с минимальными случайными возмущениями.

При скорости резания $v > 1,5$ м/с и выше случайные возмущения равнодействующей силы резания становятся статистически значимыми (рис. 8), и, как следствие, амплитуда колебаний корреляционной функции с течением времени изменяется (см. рис. 7, а). Для спектральной плотности в этом случае характерно наличие нескольких пиков (см. рис. 7, б).

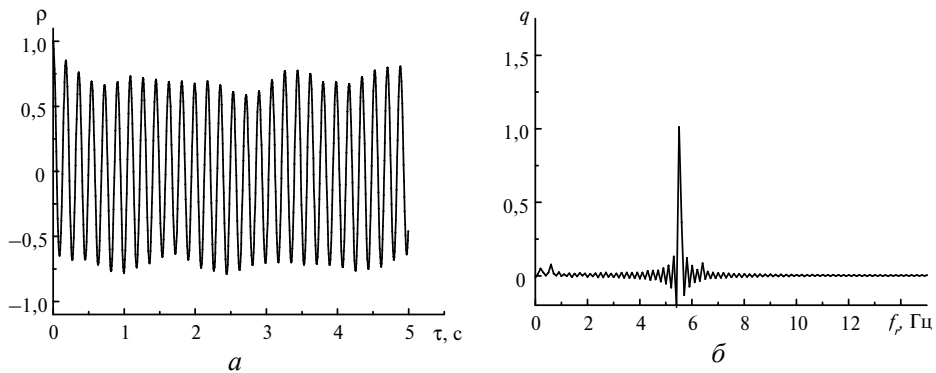


Рис. 7. Нормированные корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) равнодействующей силы резания при точении с подачей $S = 0,1$ мм/об и скоростью резания $v = 2,2$ м/с.

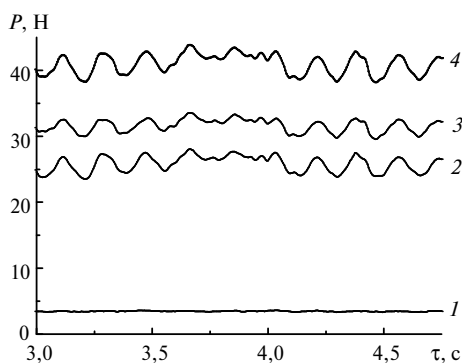


Рис. 8. Зависимость случайных возмущений составляющих $P_x(1)$, $P_y(2)$, $P_z(3)$ и равнодействующей $R(4)$ силы резания от времени при точении титанового сплава с подачей $S = 0,1$ мм/об и скоростью резания $v = 2,2$ м/с.

Анализ корреляционных функций и спектральных плотностей во всем диапазоне изменения скорости резания показывает, что для равнодействующей силы резания R доминируют детерминированные изменения с наложением стохастических воздействий. Поэтому изменение равнодействующей $R(\tau)$ силы резания происходит детерминировано вокруг среднего значения по гармоническому закону

$$R(\tau) = R_m + A_R \sin(2\pi f_R \tau) + R_c(\tau), \quad (2)$$

где R_m – среднее значение равнодействующей силы резания; A_R и f_R – амплитуда и частота колебаний равнодействующей силы резания; $R_c(\tau)$ – амплитуда случайных колебаний равнодействующей силы резания; τ – время.

Частота колебаний f_R равнодействующей силы резания связана с частотой вращения шпинделя $f_{ш}$:

$$f_R \approx 0,37f_{ш}.$$

Зависимости возникновения случайных возмущений составляющих и равнодействующих силы резания от времени показаны на рис. 8. Исследования проводили при разной скорости резания ($v = 0,5-4,0$ м/с). При скорости резания $v > 1,5$ м/с вероятность появления значительных случайных возмущений возрастает.

На основании экспериментальных данных, выполнено математическое моделирование равнодействующей силы резания, что позволило для каждого эксперимента с использованием формулы (2) определить амплитуду колебаний A_R и СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$.

На рис. 9, *a*, *б* приведены изменения амплитуд A_R и СКО σ_c случайных колебаний $R_c(\tau)$ в зависимости от скорости резания v .

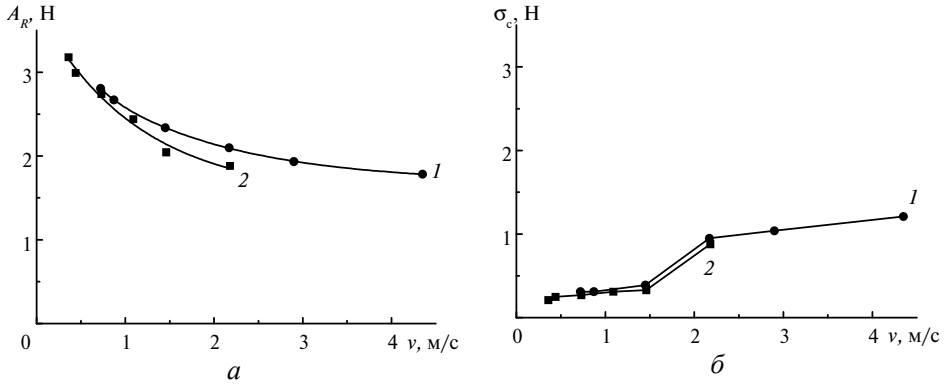


Рис. 9. Изменение амплитуды колебаний A_R (*a*) и СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$ (*б*) в зависимости от скорости резания v ; $S = 0,05$ (1) и $0,1$ (2) мм/об.

Из анализа рис. 9 следует, что с увеличением скорости резания амплитуда регулярных колебаний A_R силы резания уменьшается (см. рис. 9, *a*). При этом наблюдается увеличение СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$ (см. рис. 9, *б*).

Особо следует выделить диапазон скоростей v от 1,5 до 2,5 м/с. В этом диапазоне, как выше было отмечено, наблюдается превышение температуры в зоне резания 700°C . Поэтому скачкообразное увеличение СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$ (см. рис. 9, *б*) обусловлено взаимодействием резца с образованными в поверхностном слое заготовки оксидов и нитридов титана. С дальнейшим ростом скорости резания v увеличивается температура в зоне резания (см. рис. 4), при этом увеличивается и СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$. Следовательно, с ростом скорости возрастает амплитуда случайных колебаний силы резания $R_c(\tau)$. Случайные возмущения силы резания влияют на шероховатость обработанной поверхности.

Установлено, что увеличение скорости резания v приводит к увеличению параметра Ra шероховатости обработанной поверхности (рис. 10).

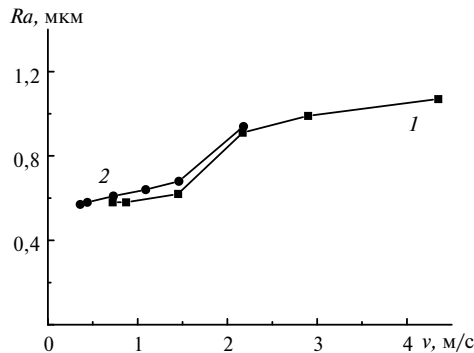


Рис. 10. Изменения параметра Ra шероховатости обработанной поверхности от скорости резания v ; $S = 0,05$ (1) и $0,1$ (2) мм/об.

Характер изменения кривых на рис. 9, б соответствует изменению кривых на рис. 10, что указывает на корреляционную связь СКО σ_c случайных возмущений $R_c(\tau)$ и параметра Ra шероховатости обработанной поверхности.

ВЫВОДЫ

При точении титанового сплава VT1-0 температура в зоне резания с увеличением скорости резания возрастает. При скорости резания $v = 1,5$ м/с она превышает 700 °С, что обуславливает образование высокотвердых оксидов и нитридов титана, а также приводит к появлению значительных случайных колебаний силы резания и, как следствие, возрастанию параметра Ra шероховатости обработанной поверхности.

При увеличении скорости резания от $1,5$ до $2,2$ м/с скачкообразно увеличиваются СКО случайных колебаний R_c силы резания и параметр Ra шероховатости обработанной поверхности.

При чистовом точении титанового сплава VT1-0 резцами с круглыми пластинами АТП равнодействующая сила резания R изменяется детерминировано с наложением стохастических возмущений $R(\tau) = R_m + A_R \sin(2\pi f_{RT}) + R_c(\tau)$.

Встановлено закономірності змін температури і сили різання, а також шорсткості обробленої поверхні в залежності від швидкості при чистовому точінні титанового сплаву VT1-0 різцем з алмазно-твердосплавною пластинною. Обґрунтовано оптимальні режими різання.

Ключові слова: *точіння, титановий сплав, алмазно-твердосплавна пластина, температура різання, сила різання, шорсткість.*

The paper addresses the variation of cutting temperatures and forces and machined surface roughness versus the cutting speed in fine turning of VT1-0 titanium alloy by a PCD tool. Optimal cutting conditions have been substantiated.

Keywords: *turning, titanium alloy, polycrystalline diamond insert, cutting temperature, cutting force, surface roughness.*

1. Кривоухов В.А., Чубаров В.Д. Обработка резанием титановых сплавов. Москва: Машиностроение, 1970. 256 с.
2. Саютин Г.И., Носенко В.А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. Москва: Машиностроение, 1980. 180 с.
3. Huang P.L., Li J.F., Sun J., Song L.Y. Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2012. Vol. 58, no. 1–4. P. 153–160.
4. Wang Z., Nakashima S., Larson M. Energy efficient machining of titanium alloys by controlling cutting temperature and vibration. *Procedia CIRP.* 2014. – Vol. 17. P. 523–528.
5. Корбут Е.В., Лабунец В.Ф. Особенности изнашивания инструмента при обработке титановых сплавов. *Проблеми тертя та зношування.* 2011. № 55. С. 83–93.
6. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. Киев: Наук. думка, 1992. 131 с.
7. Девин Л.Н., Сулима А.Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания. *Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД).* 2008. № 3. С. 24–26.
8. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. Москва: Машиностроение, 1976. 144 с.
9. Стахнив Н.Е., Девин Л.Н., Петруша И.А., Осипов А.С. Динамические явления при чистовом точении закаленных сталей инструментом из композита на основе КНБ. *Сверхтв. материалы.* 2009. № 3. 75–84 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1969. 576 с.

Поступила в редакцию 15.03.18

После доработки 24.04.18

Принята к публикации 24.04.18