

УДК 621.9.08

doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-21-31

Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой

Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Evaluation of Surface Roughness in Five-Axis Ball-End Milling

B.B. Ponomarev, S.H. Nguyen

Irkutsk National Research Technical University

В отличие от обработки на трехкоординатных станках при пятикоординатном фрезеровании концевой инструмент или заготовка могут быть ориентированы под любым углом к оси OZ станка путем изменения углов наклона и опережения оси инструмента относительно нормали к обрабатываемой поверхности в зоне касания инструментальной поверхности и заготовки с учетом направления подачи стола. Приведены результаты экспериментального исследования влияния ориентации инструмента на поперечную шероховатость канавки при чистовом фрезеровании с использованием концевых сфероцилиндрических фрез диаметром 8 мм с двумя и четырьмя зубьями. Анализ среднеарифметического отклонения профиля при различных значениях угла ориентации инструмента выявил, что качество поверхности существенно зависит от положения его точки с нулевой скоростью резания. Результаты оценки влияния ориентации инструмента на шероховатость позволяют выбрать оптимальные углы позиционирования сфероцилиндрического инструмента при концевом фрезеровании поверхностей свободной формы на пятикоординатных станках с ЧПУ.

Ключевые слова: пятикоординатное чистовое фрезерование, сфероцилиндрические фрезы, поперечная шероховатость, ориентация инструмента, ЧПУ

Unlike three-axis machining, five-axis machining allows the end tool or workpiece to be oriented at any angle relative to the machine axis OZ . It can be achieved by changing the values of the tool tilt angle and lead angle relative to the surface normal in the contact zone of the tool surface and the workpiece, taking into account the direction of the table feed. The article presents experimental results of analyzing the influences of tool orientation on transverse roughness during ball end milling using 2-flute and 4-flute 8 mm diameter mills. The analysis of the arithmetic mean deviation of the assessed profile at various values of tool tilt angle and lead angle showed that the position of the tool point with a zero cutting speed significantly affects the surface quality. The results of the evaluation of the tool orientation influence on the surface roughness enable the selection of optimal tool orientation angles when developing control programs for end milling of free-form surfaces on five-axis CNC milling machines.

Keywords: five-axis end milling, ball mills, transverse roughness, tool orientation, CNC

Фрезерные пятикоординатные станки с ЧПУ широко применяют при производстве деталей свободной формы, в аэрокосмической, автомо-

бильной и судостроительной промышленности, при создании барельефов, художественных изделий, объектов протезирования и других изде-

лий сложной формы, получаемых методами механической обработки. Большую часть формообразующих элементов технологической оснастки, предназначенной для производства деталей методами деформирования, также изготавливают на современном металлорежущем оборудовании.

При пятикоординатном фрезеровании концевой инструмент или заготовка могут быть ориентированы под любым углом к оси OZ станка. Это позволяет обрабатывать участки поверхности заготовок деталей, недоступные для концевых фрез при отсутствии двух дополнительных степеней свободы у станка, фрезеровать сложные поверхности без увеличения вылета инструмента, использовать универсальную станочную оснастку, управлять процессом путем изменения скорости резания, влияя на качество поверхности и производительность обработки.

Таким образом, при планировании процесса фрезерования у разработчика появляются два дополнительных управляемых параметра — углы наклона α и опережения β инструмента относительно нормали заготовки (рис. 1), назначаемые в зависимости от формы заготовки и получаемой детали, а также от требований, предъявляемых к качеству и производительности резания.

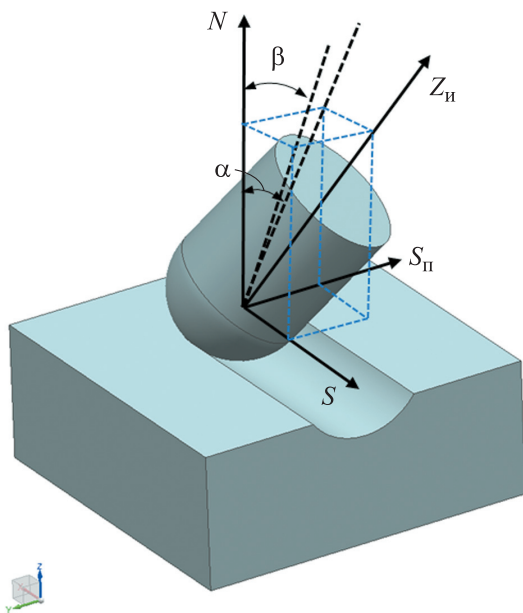


Рис. 1. Схема относительного положения инструмента и заготовки с углами наклона α и опережения β :
 N — нормаль к поверхности; S и S_n — продольная и поперечная подача стола; Z_n — ось инструмента

Для чистового фрезерования сложных поверхностей, как правило, используют концевые цилиндрические фрезы и фрезы со сферическим концом (концевые сфероцилиндрические фрезы — КСФ). Цилиндрические концевые фрезы образуют по траектории движения строки большой ширины, вследствие чего в заготовке часто возникают локальные и глобальные зарезания.

Для финишной обработки сложных поверхностей, как правило, используют КСФ, что позволяет путем оптимизации типоразмера назначаемого инструмента и расстояния между строками получать остаточный гребешок заданной высоты.

Одной из геометрических характеристик, определяющих качество обработанной поверхности, является ее шероховатость, представляющая собой совокупность неровностей с относительно малыми шагами на базовой длине [1]. Шероховатость влияет на износостойкость поверхности, усталостную прочность и прочность прессовых соединений. Уменьшение шероховатости поверхности значительно улучшает антикоррозионную стойкость детали. Качество поверхностного слоя играет важную роль в сопряжениях, отвечающих условиям герметичности и теплопроводности [2].

В настоящее время действует ГОСТ 2789–73, который определяет принятые в России параметры шероховатости изделий независимо от их материала и способа изготовления. Требования к шероховатости поверхности следует устанавливать путем указания таких параметров, как среднеарифметическое отклонение профиля Ra , наибольшая высота профиля Rz , полная высота профиля R_{max} , средний шаг неровностей S_m , средний шаг местных выступов профиля S , относительная опорная длина профиля t_p (p — значения уровня сечения профиля). При этом параметр шероховатости Ra является предпочтительным [3].

Факторы, влияющие на шероховатость, изучали многие российские и зарубежные ученые. В статье [4] Р.Р. Саакян определил характер и степень влияния режимов резания, геометрических параметров инструмента, свойств обрабатываемого материала и температуры предварительного подогрева срезаемого слоя на высоту неровностей при фрезеровании жаропрочных материалов.

Образование геометрической шероховатости при цилиндрической обработке плоскостей,

выпуклых и вогнутых поверхностей со встречной и попутной подачей рассмотрено А.А. Тихоновой в работе [5]. Установлено, что высоты остаточного сечения при встречном фрезеровании меньше, чем при попутном, а у выпуклых поверхностей больше, чем у вогнутых.

По результатам исследований Е.В. Басовой [6] получил дальнейшее развитие метод оценки шероховатости поверхности на базе интегрального функционала качества с учетом деформационных процессов в заготовке, обработанной по технологии высокоскоростного фрезерования.

В трудах В.А. Ким [7, 8] доказано, что шероховатость при цилиндрическом фрезеровании определяется кинематикой резания, разрушением срезаемого слоя, трением обработанной поверхности о заднюю поверхность режущего зуба фрезы и радиусом округления ее режущей кромки. При этом продемонстрированы роль каждого из факторов и циклический характер их проявления.

В статье М.Г. Игнатова [9] приведены новые результаты экспериментального исследования встречного фрезерования. Для повышения точности и уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности предложено изменять направление вертикальной составляющей силы резания, подбирая глубину фрезерования как функцию диаметра фрезы.

Работы А. Логинса [10] и С. Нэджи Раваля [11] посвящены исследованию влияния скорости резания на шероховатость полученной поверхности при концевом фрезеровании. Зависимость шероховатости паза после фрезерова-

ния от технологических факторов, особенно от смазочно-охлаждающей жидкости, изучали М.В. Ванг и Х.В. Чанг [12].

Исследователь С. Женю [13] предложил алгоритм прогнозирования шероховатости обработанной поверхности, учитывающий влияние статических и динамических факторов на шероховатость.

Цель работы — оценка изменения поперечной шероховатости канавки — шероховатости поверхности, измеренной по направлению подачи стола в строке траектории движения инструмента и независимой от высоты гребешка — при пятикоординатном фрезеровании заготовки с использованием КСФ.

Результаты такой оценки позволят установить зависимость параметров микрорельефа обработанной детали от ориентации инструмента относительно ее поверхности и достичь повышения качества резания.

Экспериментальное исследование шероховатости поверхности при фрезеровании. Для оценки качества поверхности, получаемой при чистовом фрезеровании поверхности заготовки концевыми сфероцилиндрическими фрезами, проведены экспериментальные исследования.

В качестве заготовки выбраны пластины размером 120×120×10 мм, выполненные из стали Ст3. Обработка проведена на пятикоординатном фрезерном станке HSC 75 linear с использованием КСФ диаметром 8 мм с двумя и четырьмя зубьями. Для подготовки управляющих программ использован САМ-модуль программы Unigraphics NX.

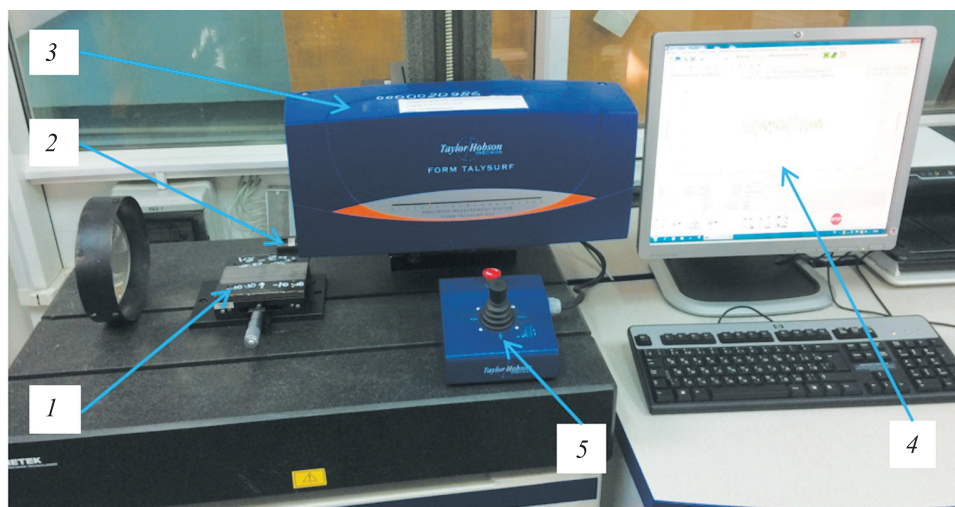


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки:
1 — деталь; 2 — щуп; 3 — профилометр TalySurf i-200; 4 — монитор; 5 — блок джойстика

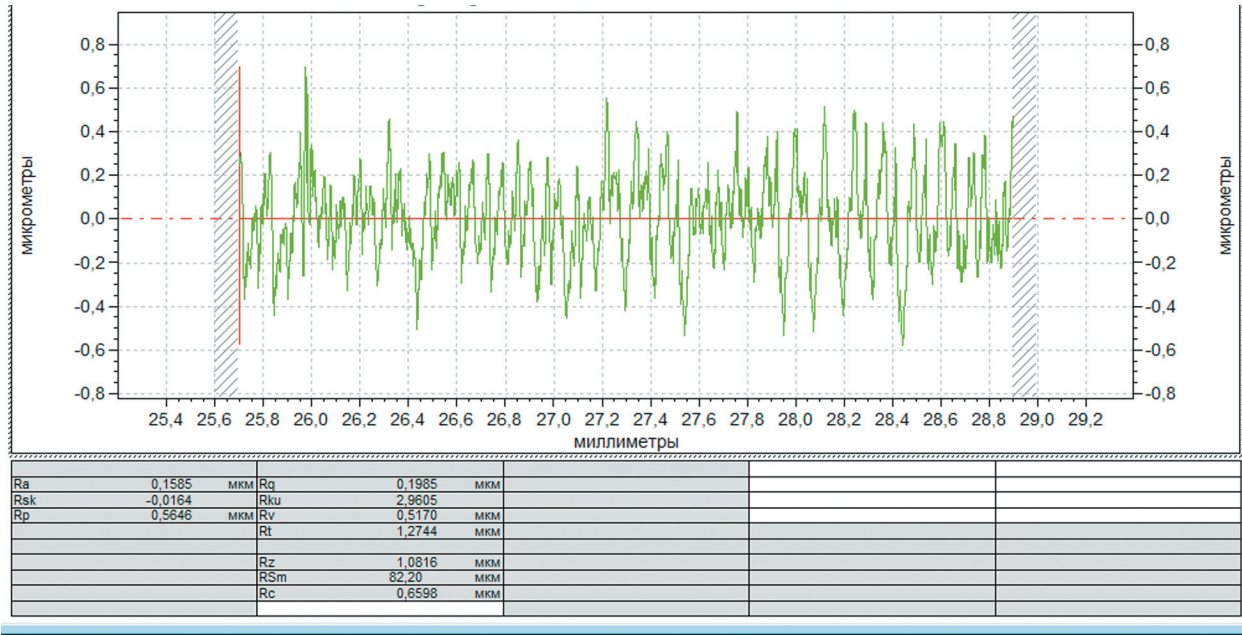


Рис. 3. Результаты измерения шероховатости поверхности (профилограмма поверхности)

Для исследования влияния позиции инструмента относительно нормали к заготовке в точке их касания на шероховатость обрабатываемой поверхности приняты следующие неизменные режимы резания:

- глубина резания $t = 0,2$ мм;
- частота вращения шпинделя $n = 6000$ мин⁻¹;
- подача на зуб $S_z = 0,01$ и $0,02$ мм/зуб.

Измерения шероховатости поверхности после фрезерования проведены контактным методом на профилометре TalySurf i-200, входящем в состав экспериментальной установки (рис. 2). Принцип работы этого прибора состоит в следующем. При измерении ось иглы расположена по нормали к поверхности. Во время движения ощупывающей головки относительно испытываемой поверхности игла, опускаясь во впадины, а затем, поднимаясь на выступы микронеровностей, начинает колебаться относительно головки, повторяя по значению и форме огибаемый профиль поверхности.

Механические колебания иглы преобразовываются в электрические с помощью электро-механического преобразователя. Снятый с преобразователя полезный сигнал усиливается, после чего измеряются его параметры, подобные таковым для неровностей испытываемой поверхности (профилометрирование), или записывается профиль поверхности в выбранных вертикальном и горизонтальном масштабах (профилографирование) [14].

Для обработки результатов измерения и определения основных параметров шероховатости использовано программное обеспечение ULTRA. Базовая длина выбрана по ГОСТ 2789–73. Длина оценки равна пяти базовым длинам. Конечной задачей исследования являлось установление зависимости качества поверхности от ориентации инструмента относительно нормали заготовки к поверхности. С помощью программы ULTRA по результатам измерения шероховатости поверхности профилометром можно определять различные параметры шероховатости (рис. 3).

В целях выявления влияния ориентации КСФ на качество получаемой поверхности, определяли только среднеарифметическое от-

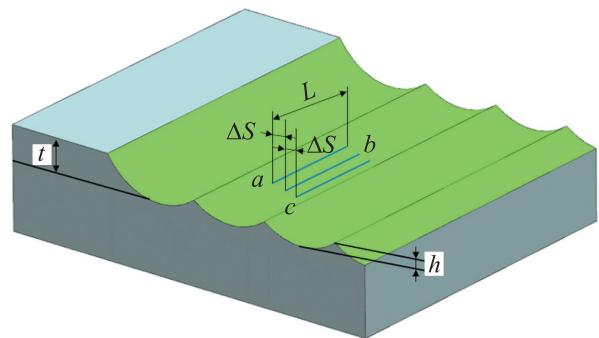


Рис. 4. Позиции трассы иглы профилометра при измерении шероховатости поверхности на линии траектории движения инструмента (h — высота остаточного гребешка; L — длина оценки шероховатости)

клонение профиля Ra . Для каждой линии траектории движения инструмента измеряли параметр Ra в трех позициях: в центре траектории движения инструмента b , в левой a и правой части c на расстоянии $\Delta S = 0,5$ мм от b (рис. 4). Для каждой позиции измерения проводили три испытания вдоль линии обработанной канавки, определяя шероховатость как среднее значение трех экспериментов.

Влияние угла наклона КСФ на шероховатость поверхности. По правилу правого винта при описании преобразований системы координат инструмента в систему координат заготовки и, наоборот, положительными считаются углы наклона и опережения КСФ, отсчитываемые по

ходу часовой стрелки, если смотреть с острия оси, вокруг которой происходит условный поворот [15]. Причем значения угла наклона могут находиться в интервале $\alpha = -90 \dots 90^\circ$.

При обработке поверхности концевой фрезой со сферической частью радиусом 4 мм, с глубиной резания $t = 0,2$ мм и изменяющимися углами наклона α и опережения β инструмента от 0° в сторону положительных и отрицательных значений точка КСФ с нулевой скоростью начинает выходить из зоны контакта с заготовкой при угле $\pm 18,2^\circ$.

Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре, левой и правой частях канавки, от угла наклона КСФ с двумя и четырьмя зубьями при подаче на зуб $S_z =$

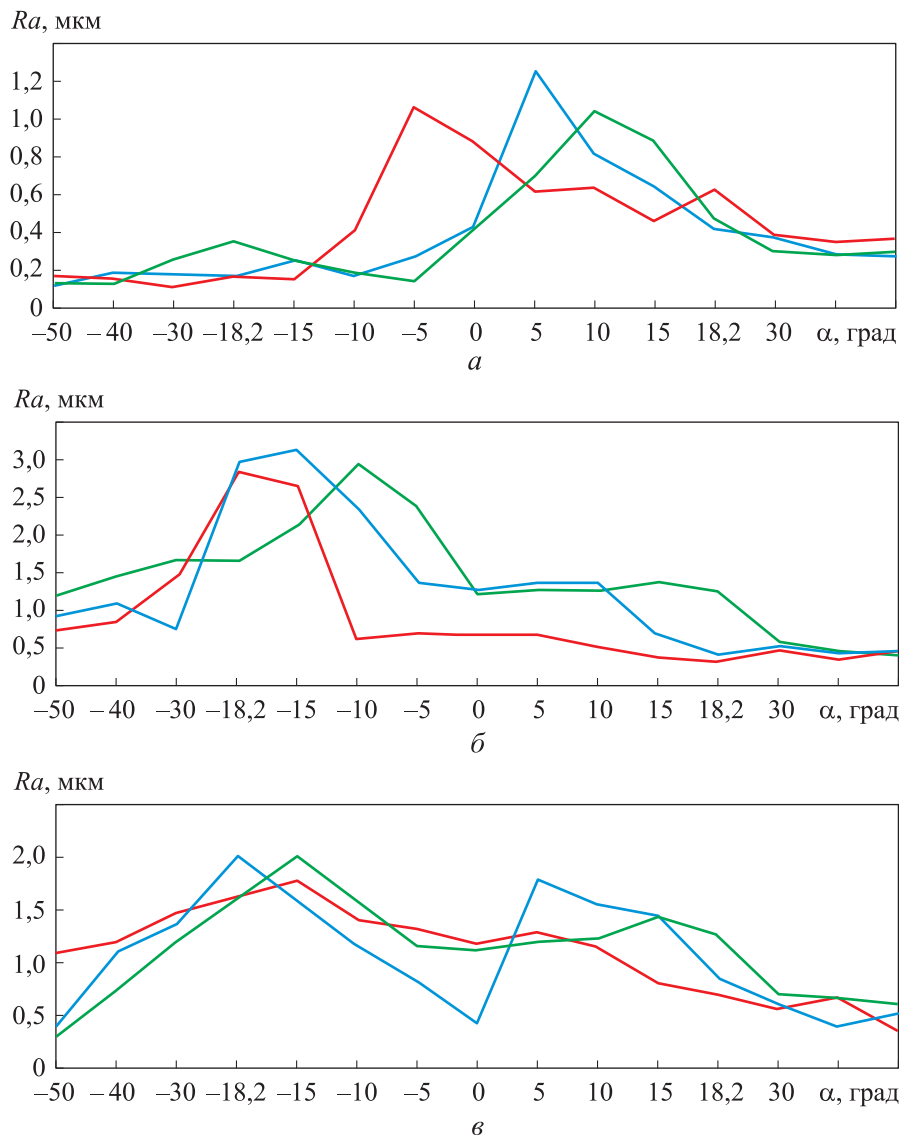


Рис. 5. Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре (—), левой (—) и правой (—) частях канавки, от угла наклона КСФ α при различных значениях числа зубьев инструмента и подачи на зуб: $a - Z = 2, S_z = 0,02$ мм/зуб; $b - Z = 4, S_z = 0,02$ мм/зуб; $в - Z = 4, S_z = 0,01$ мм/зуб

= 0,01 и 0,02 мм/зуб приведены на рис. 5, а–в. Здесь видно, что при одинаковых режимах резания шероховатость поверхности после обработки четырехзубой фрезой больше, чем после фрезерования двузубой.

Это обусловлено повышением скорости подачи стола в 2 раза вследствие увеличения числа зубьев инструмента Z , а также особенностью их заточки (радиусы сферических поверхностей, образуемых противоположно расположенными зубьями различны).

При использовании КСФ с двумя зубьями (см. рис. 5, а) параметр шероховатости в трех позициях измерения значительно увеличивается в интервале угла наклона инструмента $\alpha =$

$= 0 \dots 18,2^\circ$, когда точка КСФ с нулевой скоростью резания еще находится в зоне контакта с заготовкой.

При этом происходит процесс снятия стружки по двум направлениям с проявлением неравномерности в объеме удаляемого материала (при попутном фрезеровании зуб снимает больший объем стружки). Также можно заключить, что при отрицательном угле наклона КСФ шероховатость, оставаясь неизменной, соответствует повышенному качеству получаемой поверхности.

Как видно из рис. 5, б, параметр шероховатости поверхности R_a , обработанной четырехзубой КСФ с подачей на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб,

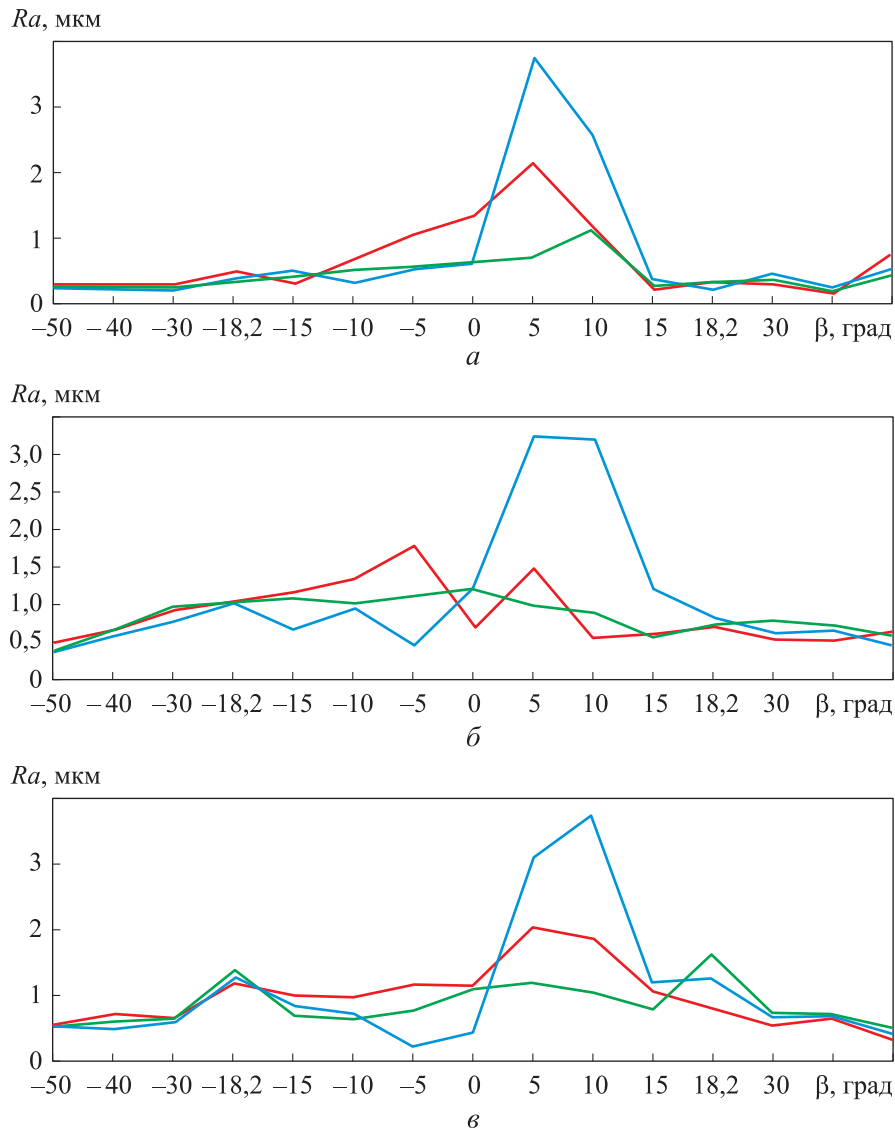


Рис. 6. Зависимости параметра шероховатости R_a , измеренного в центре (—), левой (—) и правой (—) частях канавки, от угла опережения КСФ β при различных значениях числа зубьев инструмента и подачи на зуб:

а — $Z = 2$, $S_z = 0,02$ мм/зуб; б — $Z = 4$, $S_z = 0,02$ мм/зуб; в — $Z = 4$, $S_z = 0,01$ мм/зуб

более стабилен при положительных углах наклона КСФ и увеличивается в интервале $\alpha = -18,2...0^\circ$.

На рис. 5, в приведены результаты измерения параметра шероховатости поверхности Ra , обработанной четырехзубой фрезой с подачей на зуб $S_z = 0,01$ мм/зуб. При этом скорость подачи стола такая же, что при использовании двузубой КСФ с подачей на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб. Из графиков видно, что шероховатость повышается при нахождении точки КСФ с нулевой скоростью в зоне контакта с заготовкой (как для отрицательных углов наклона КСФ, так и для положительных).

Влияние угла опережения КСФ на шероховатость поверхности. Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре, левой и правой частях канавки, от угла опережения КСФ с двумя и четырьмя зубьями при подаче на зуб $S_z = 0,01$ и $0,02$ мм приведены на рис. 6, а–в.

В интервале угла опережения КСФ $\beta = 0...15^\circ$ точка инструмента с окружной скоростью, равной нулю, находится в зоне снятия стружки, а ось КСФ расположена противоположно направлению подачи стола. При этом процесс фрезерования схож со сверлением, характеризуемым большими значениями сил сопротивления при резании. Как видно из рис. 6, при таких условиях шероховатость в центре канавки повышается почти в 10 раз.

В диапазонах угла опережения КСФ $\beta = -30...0^\circ$ и $\beta = 18,2...30^\circ$ точка с нулевой скоростью резания инструмента находится вне зоны его касания с заготовкой. При этом увеличивается эффективный диаметр КСФ, а следовательно, и его скорость резания, вследствие чего шероховатость поверхности остается стабильной.

Влияние ориентации КСФ на шероховатость поверхности при одновременном изменении углов ее наклона и опережения. Для двухфакторного анализа влияния ориентации фрезы на шероховатость поверхности проведены испытания с варьированием углов ее наклона α и опережения β в интервале $-30...30^\circ$ с шагом 10° для каждого типа КСФ. Инструмент ориентирован относительно нормали к обрабатываемой поверхности. Для каждого типа фрез выполнено 49 испытаний.

Угол между осью КСФ и нормалью к поверхности в точке касания определяли по формуле

$$\gamma = \arctg(\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}).$$

В таблице приведены соответствующие значения угла γ при различных значениях углов наклона и опережения.

Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре, правой и левой частях канавки, от углов наклона α и опережения β КСФ с двумя и четырьмя зубьями при подаче на зуб $S_z = 0,02$ и $0,01$ мм/зуб приведены на рис. 7–9.

Как видно из рис. 7, при концевом фрезеровании двузубой КФС характеры изменения параметра шероховатости Ra в центре, правой части и левой части канавки подобны. Повышенная шероховатость наблюдается в интервалах угла наклона $\alpha = 20...10^\circ$ и угла опережения $\beta = 0...20^\circ$.

Согласно рис. 8, при отрицательном угле опережения и положительном угле наклона КФС параметр шероховатости Ra увеличивается. В то время как при положительном угле опережения КФС независимо от направления угла ее наклона этот параметр уменьшается.

Значения углов, определяющих положение КСФ

Угол опережения КСФ β , град	Угол γ , град, при угле наклона КСФ α , град						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
-30	39,232	34,314	31,118	30	31,118	34,314	39,232
-20	34,314	27,236	22,020	20	22,020	27,236	34,314
-10	31,118	22,020	14,002	10	14,002	22,020	31,118
0	30,000	20,000	10,000	0	10,000	20,000	30,000
10	31,118	22,020	14,002	10	14,002	22,020	31,118
20	34,314	27,236	22,020	20	22,020	27,236	34,314
30	39,232	34,314	31,118	30	31,118	34,314	39,232

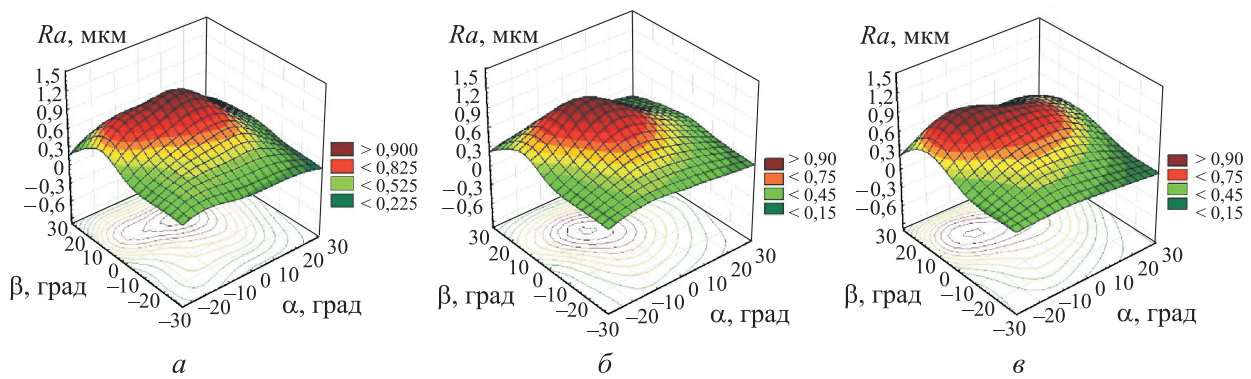


Рис. 7. Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре (а), правой (б) и левой (в) частях канавки, от углов наклона α и опережения β двузубой КФС с подачей на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб

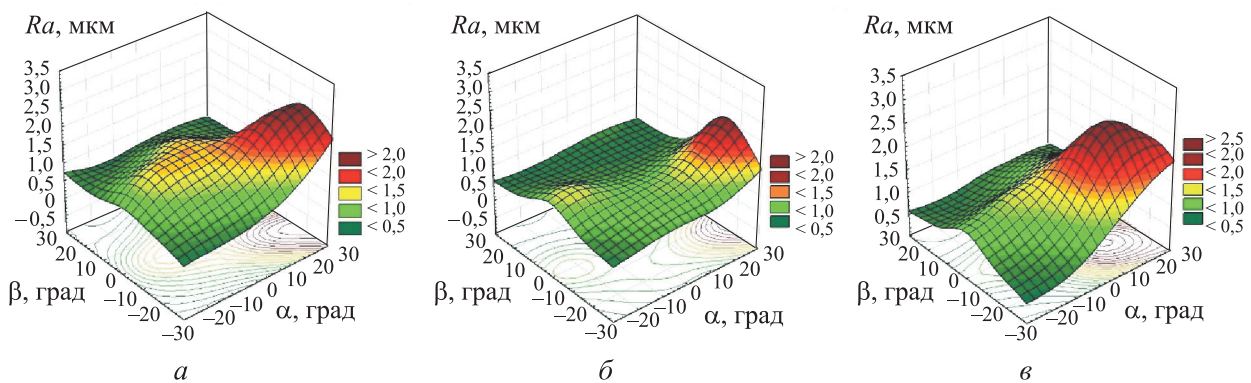


Рис. 8. Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре (а), правой (б) и левой (в) частях канавки, от углов наклона α и опережения β четырехзубой КФС с подачей на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб

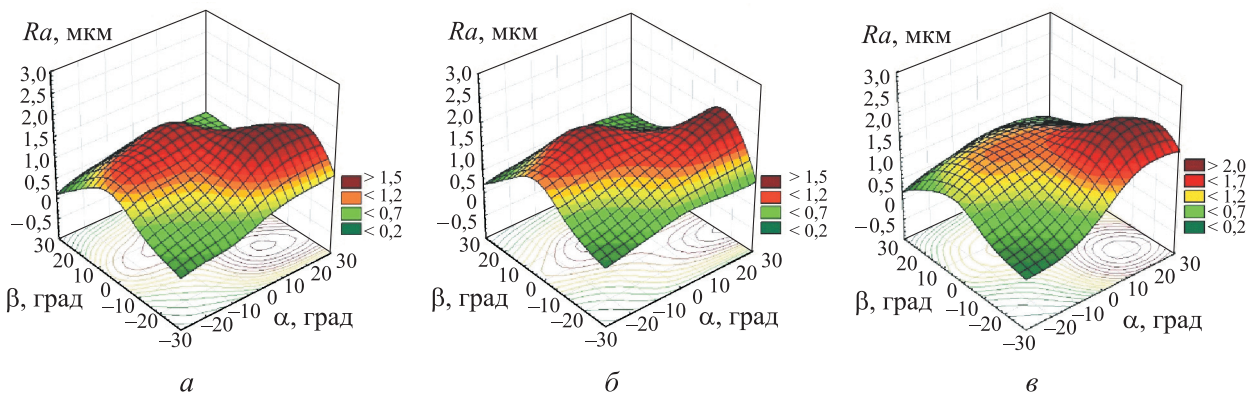


Рис. 9. Зависимости параметра шероховатости Ra , измеренного в центре (а), правой (б) и левой (в) частях канавки, от углов наклона α и опережения β четырехзубой КФС с подачей на зуб $S_z = 0,01$ мм/зуб

Как видно из рис. 9, максимальное значение параметра шероховатости поверхности Ra , обработанной четырехзубой КФС с подачей на зуб $S_z = 0,01$ мм/зуб, составляет 2 мкм. Отсюда следует, что качество полученной поверхности хуже, чем при использовании двузубой КФС с постоянной подачей стола и лучше, чем при подаче $S_z = 0,02$ мм/зуб с такой же фрезой.

Это можно объяснить усадкой стружки при малой подаче на зуб. Причем в результате

деформации обрабатываемого материала при его переходе в стружку толщина последней становится больше толщины срезаемого слоя, а ее длина короче пути, пройденного резцом [16].

Анализ всех графических зависимостей позволяет заключить, что параметры шероховатости Ra при использовании концевых фрез с разным числом зубьев значительно различаются как по характеру, так и по значению.

Выводы

1. Результаты анализа шероховатости поверхностей, получаемых при концевом фрезеровании КСФ, позволили заключить следующее:

- ориентация и число кромок инструмента при пятикоординатном фрезеровании существенно влияют на качество поверхности; при постоянном режиме обработки с увеличением числа зубьев среднеарифметическое отклонение профиля Ra повышается до 2 раз;
- для углов наклона и опережения КСФ, по абсолютной величине превышающих значения, при которых точка инструмента, имеющая нулевую скорость резания, выходит из процесса образования и удаления стружки, параметр шероховатости Ra уменьшается;
- при встречном фрезеровании поверхности двузубой КСФ параметр шероховатости

Ra меньше, чем при попутном, и наоборот, Ra больше при попутном фрезеровании с использованием четырехзубой КСФ.

2. Результаты исследования влияния ориентации КСФ с двумя и четырьмя зубьями на шероховатость поверхности позволяют рекомендовать технологам и разработчикам управляющих программ использовать приведенные графические зависимости для получения установленных конструкторской документацией требований к качеству поверхности детали. Так, дву- и четырехзубыми фрезами со сферической частью радиусом 4 мм можно рекомендовать вести чистовую обработку при углах наклона и опережения инструмента относительно нормали к поверхности в пределах $-30\dots-18,2^\circ$ или $18,2\dots30^\circ$ при частоте вращения шпинделя $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$, подаче на зуб $S_z = 0,02 \text{ мм/зуб}$ и глубине резания $t = 0,2 \text{ мм}$.

Литература

- [1] Гурдин В.И., Залознов И.П., Чебоксаров А.Н. *Исследование влияния режимов резания на качество обработки*. Омск, СибАДИ, 2013. 20 с.
- [2] Суслов А.Г., Корсакова И.М. *Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин*. Москва, МГИУ, 2010. 111 с.
- [3] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. Москва, Стандартинформ, 2018.
- [4] Саакян Р.Р., Багдасарян Г.Б., Наджарян М.Т. Исследование шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании жаропрочных материалов ЖС6 и ЖС3. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*, 2010, № 1(153), с. 79–83.
- [5] Тихонова А.А., Виноградов Д.В. Геометрическая шероховатость при попутном и встречном фрезеровании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 11, с. 68–71, doi: 10.18698/0536-1044-2011-11-68-71
- [6] Басова Е.В. Описание шероховатости поверхности, обработанной методом высокоскоростного фрезерования. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2015, № 1(108), с. 95–100.
- [7] Ким В.А., Щелкунов Е.Б., Бреев С.В. Шероховатость обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2010, т. 1, № 1, с. 62–66.
- [8] Ким В.А., Щелкунов Е.Б., Бреев С.В. Влияние округления режущей кромки на шероховатость поверхности после фрезерования. *Технология машиностроения*, 2011, № 5, с. 25–27.
- [9] Игнатов М.Г., Перминов А.Е., Прокофьев Е.Ю. Влияние вектора вертикальной составляющей силы резания на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности при встречном фрезеровании. *Вестник машиностроения*, 2008, № 9, с. 49.
- [10] Logins A., Torims T. The influence of high-speed milling strategies on 3D surface roughness parameters. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1253–1261, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.491
- [11] Ravai Nagy S., Paşca I., Lobonţiu M., Banica M. Experimental research of effective cutting speed influence on surface roughness in ball end milling of C45 material with hardness 34 HRC. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657, pp. 53–57, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.53

- [12] Wang M.Y., Chang H.Y. Experimental study of surface roughness in slot end milling Al2014-T6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44(1), pp. 51–57, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.011
- [13] Zhenyu S., Luning L., Zhanqiang L. Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 80(9-12), pp. 1823–1831, doi: 10.1007/s00170-015-7127-x
- [14] Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. *Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхностей*. Москва, Машиностроение, 1978. 232 с.
- [15] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. Москва, Мир, 1982. 680 с.
- [16] Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. *Резание материалов*. Москва, Машиностроение, 2007. 303 с.

References

- [1] Gurdin V.I., Zaloznov I.P., Cheboksarov A.N. *Issledovaniye vliyaniya rezhimov rezaniya na kachestvo obrabotki* [Study of the influence of cutting conditions on the quality of processing]. Omsk, SibADI publ., 2013. 20 p.
- [2] Suslov A.G., Korsakova I.M. *Naznachenkiye, oboznachenkiye i kontrol' parametrov sherokhovatosti poverkhnostey detaley mashin* [Purpose, designation and control of surface roughness parameters of machine parts]. Moscow, MSIU publ., 2010. 111 p.
- [3] GOST 2789–73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [State Standard 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Standartinform publ., 2018.
- [4] Saakyan R.R., Bagdasaryan G.B., Nadzharyan M.T. The study of the surface roughness during milling of heat-resistant materials ZhS6 and ZhS3. *North-Caucasian region technical sciences series*, 2010, no. 1(153), pp. 79–83 (in Russ.).
- [5] Tikhonova A.A., Vinogradov D.V. Geometrical surface roughness in cylindrical conventional milling and climb milling. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 11, pp. 68–71 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2011-11-68-71
- [6] Basova E.V. Description surface roughness treated by high-speed milling. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*, 2015, no. 1(108), pp. 95–100 (in Russ.).
- [7] Kim V.A., Shchelkunov E.B., Breyev S.V. Roughness of machined surface during slab milling. *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 62–66 (in Russ.).
- [8] Kim V.A., Shchelkunov E.B., Breyev S.V. The influence of rounding of a cutting edge on a roughness of surface after milling. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2011, no. 5, pp. 25–27 (in Russ.).
- [9] Ignatov M.G., Perminov A.E., Prokofev E.Yu. Influence of the vertical cutting force on the surface precision and roughness in opposed milling. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 9, pp. 864–865, doi: 10.3103/S1068798X08090074
- [10] Logins A., Torims T. The influence of high-speed milling strategies on 3D surface roughness parameters. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1253–1261, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.491
- [11] Ravai Nagy S., Paşca I., Lobonţiu M., Banica M. Experimental research of effective cutting speed influence on surface roughness in ball end milling of C45 material with hardness 34 HRC. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657, pp. 53–57, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.53
- [12] Wang M.Y., Chang H.Y. Experimental study of surface roughness in slot end milling Al2014-T6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44(1), pp. 51–57, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.011
- [13] Zhenyu S., Luning L., Zhanqiang L. Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 80(9-12), pp. 1823–1831, doi: 10.1007/s00170-015-7127-x

- [14] Dunin-Barkovskiy I.V., Kartashova A.N. *Izmereniye i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnostey* [Measurement and analysis of surface roughness, waviness and non-circularity]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1978. 232 p.
- [15] Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Math Handbook (for scientists and engineers)]. Moscow, Mir publ., 1982. 680 p.
- [16] Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Rezaniye materialov* [Cutting of materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2007. 303 p.

Статья поступила в редакцию 05.12.2019

Информация об авторах

ПОНОМАРЕВ Борис Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: pusw@istu.edu).

НГУЕН Ши Хьен — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: syhiendk35@gmail.com).

Information about the authors

PONOMAREV Boris Borisovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: pusw@istu.edu).

NGUYEN Sy Hien — Postgraduate, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: syhiendk35@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х. Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 21–31, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-21-31

Please cite this article in English as:

Ponomarev B.B., Nguyen S.H. Evaluation of Surface Roughness in Five-Axis Ball-End Milling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 21–31, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-21-31



**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие**

«Тактическая подготовка»

**Авторы: В.А. Власов, А.П. Дудь, И.В. Иванюк,
В.В. Истомин, В.А. Кузнецов, Е.А. Шекунов**

Изложены основы тактической подготовки общевойсковых подразделений и их всестороннего обеспечения, вопросы военной топографии.

Для студентов, обучающихся по программам подготовки офицеров запаса и кадра.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru