

УДК 621.91.01

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗАНИЕМ

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;
Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ; Г.И. ГВОЗДЬ
(Полоцкий государственный университет);
д-р техн. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

Проанализированы кинематические особенности обработки сферических поверхностей вращающимся инструментом на высокой скорости резания, формирование поверхности резания и срезаемого слоя, изменение углов лезвия в процессе резания. Приведены результаты экспериментальных исследований физических характеристик срезаемого слоя, микрорельефа и микротвердости получаемой поверхности детали, в том числе после нанесения покрытия из TiN ионно-плазменным методом, подтверждающие снижение высоты неровностей и повышение микротвердости по сравнению с традиционными методами получения сферических поверхностей.

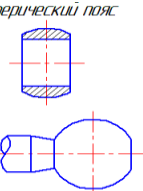
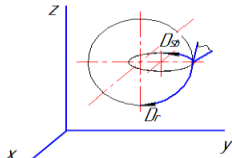
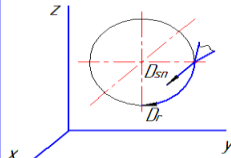
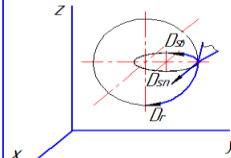
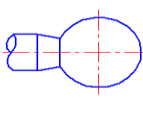
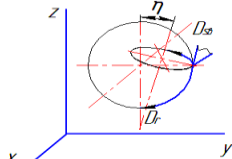
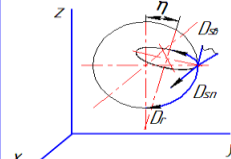
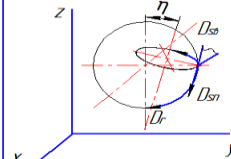

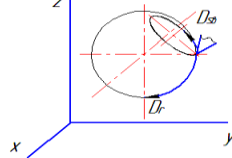
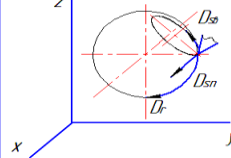
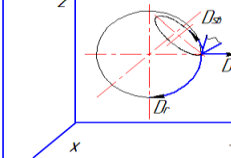
Ключевые слова: сферическая поверхность, комбинированная обработка, кинематические особенности, микрорельеф, микротвердость.

Введение. К деталям, контактирующим в узлах трения по сферическим поверхностям, предъявляются повышенные требования по их износо- и коррозионной стойкости [1]. В работах [2; 3 и др.] предлагается для улучшения эксплуатационных свойств таких деталей нанесение на их поверхности путем пластического деформирования (накатывание) и резания (лезвийная и абразивная обработка) регулярного микрорельефа. В данной работе для этих целей используется способ механической обработки резанием, реализуемый на универсальных и специальных станках, оснащенных скоростным приводом (частота вращения 10000 мин⁻¹ и более) [4], а также ионно-плазменная обработка в вакууме [5].

1. Кинематические и геометрические особенности формирования сферических поверхностей

Способ реализуется по одной из кинематических схем резания, представленных в таблице 1.

Таблица 1. – Кинематические схемы комбинированной обработки резанием сферических поверхностей деталей

Форма сферической поверхности	Кинематическая схема резания		
	Чистовая обработка	Черновая обработка	
сферический пояс 	двухэлементная схема 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема 
сферический сегмент 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема с продольной подачей (вдоль оси главного движения) 	трехэлементная схема с поперечной подачей (под углом η к оси главного движения) 
сферический сегмент 	двухэлементная схема 	трехэлементная схема с продольной подачей (вдоль оси главного движения) 	трехэлементная схема с поперечной подачей (под углом 45° к оси главного движения) 

Обрабатываются сферические поверхности неполных форм – ограниченные плоскостью с одной или с двух сторон. Кинематическая схема резания может быть двух- и трехэлементной (соответственно два вращательных движения; два вращательных и одно поступательное движение), реализуемая на трех переходах операции формообразования сферы. На первом переходе происходит врезание вращающегося инструмента во вращающуюся заготовку (черновая обработка), причем направление поступательного движения врезания (подача) Dsn происходит по оси главного вращательного движения инструмента Dr . Ось вращательного движения подачи заготовки Dsv направлена под углом η к оси главного вращательного движения, то есть реализуется одновременно вид осевой обработки – зенкерование, так как инструмент имеет три и более лезвий, и вид фрезерования. На втором переходе происходит выхаживание поверхности (получистовая обработка) и реализуется двухэлементная кинематическая схема резания с главным вращательным движением инструмента Dr и вращательным движением подачи заготовки Dsv . На третьем переходе, когда лезвия инструмента выходят на требуемый размер сферы, реализуется выглаживание (чистовая обработка) поверхности сферы. На этих переходах возможно наряду со встречным движением Dr и Dsv их попутное вращение, что будет способствовать более качественному выглаживанию поверхности.

При двухэлементной кинематической схеме траектория резания представляет собой циклоиду, наведенную на окружность сферы (рисунок 1), а при трехэлементной схеме резания траектория резания представляет собой циклоиду, наведенную на окружность сферы по спирали (рисунок 2). В связи с малыми скоростями движений подачи Dsv и Dsn форму одного витка циклоиды можно рассматривать как окружность.

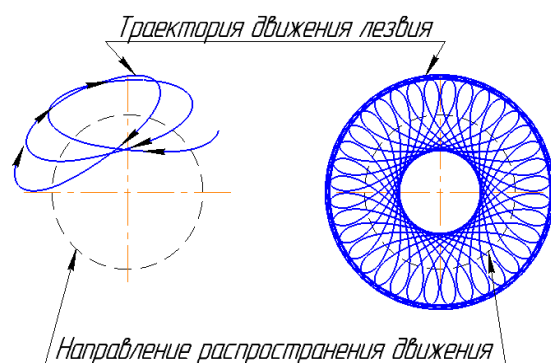
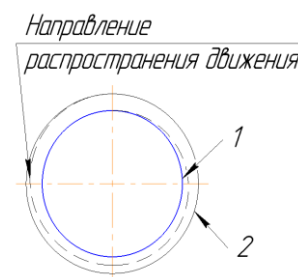


Рисунок 1. – Траектория при двухэлементной схеме резания



1 – получаемая сферическая поверхность;
2 – поверхность заготовки
Рисунок 2. – Траектория при трехэлементной схеме резания

На рисунке 3 представлена развертка сферической поверхности детали на плоскость с длиной окружности $\pi Dc\phi$ и проекция развертки окружности инструмента с длиной πDi в плоскости, перпендикулярной оси ее вращения, для перехода выхаживания. Показаны направления векторов скоростей вращения инструмента v и сферы v_s для случая их встречного направления. При изменении направления одного из вращений будет осуществляться попутное резание. Линейная скорость точки сферы в различных ее диаметральных сечениях изменяется от максимальных значений при наибольшем диаметре (на экваторе) до нуля в полюсах сферы.

При переходе от трех- к двухэлементной кинематической схеме резания изменяется величина и направление в пространстве результирующей скорости резания (рисунок 4) за счет включения и отключения поступательного движения Dsn . Это приводит к изменению положения отсчетных для определения углов инструмента плоскостей, в частности рабочей плоскости $Ps-Ps$.

При врезании инструмента в заготовку за счет скорости поступательного движения \vec{v}_{sn} режущая кромка, связанная с углом в плане ϕ участвует в срезании наибольшей стороны сечения срезаемого слоя, то есть является участком главной режущей кромки. На переходе выхаживания, когда поступательное движение Dsn отсутствует, положение рабочей плоскости изменяется (положение Ps_6-Ps_6) и вспомогательный угол в плане ϕ принимает меньшее значение по сравнению с ϕ . Как известно, значения углов ϕ и ϕ приводят к снижению формируемых неровностей на поверхности сферы. Изменение значений передних и задних углов лезвия в диапазоне принятых в работе значений $v_r \gg \dots$ – незначительное (в пределах 0,25 градуса). Эти углы могут существенно изменяться в случае перехода от режима фрезерования к режиму точения сферы, когда $v_{sn} \gg \dots$.

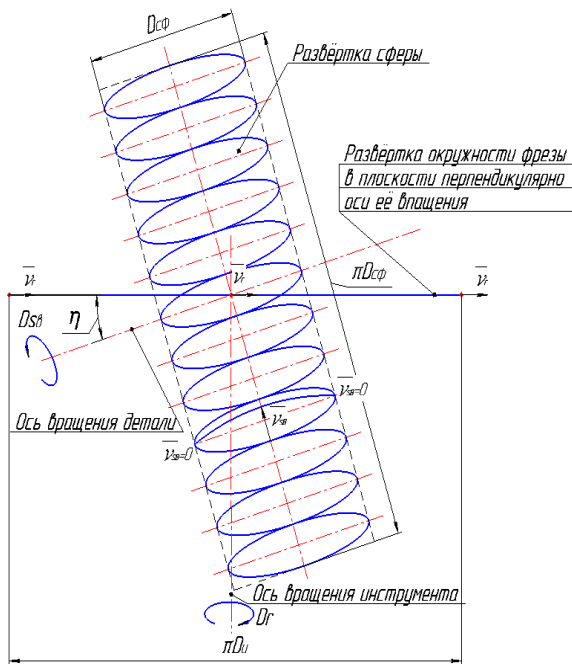


Рисунок 3. – Развертка поверхности сферы и окружности инструмента на плоскость

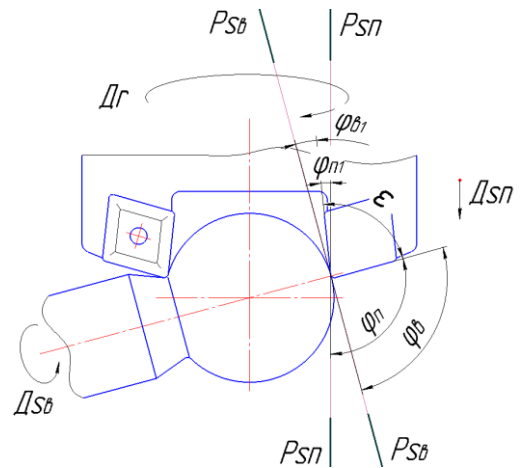
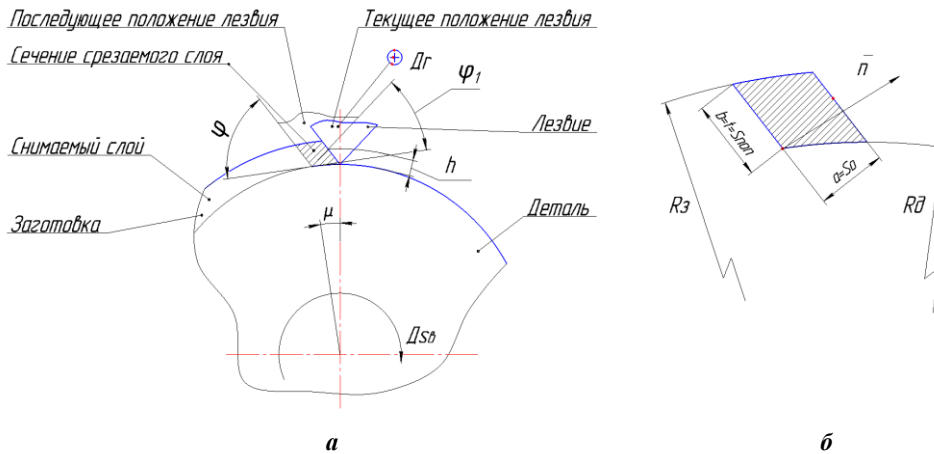


Рисунок 4. – Изменение кинематических главного ψ и вспомогательного ψ_1 углов в плане

Срезаемый слой формируется за один оборот инструмента в главном движении резания. Учитывая, что сферическая поверхность образуется при больших значениях скорости резания, необходимо рассматривать так называемое «мгновенное» сечение срезаемого каждым лезвием инструмента слоя (рисунок 5).



a – схема формирования снимаемого и срезаемого слоев; *б* – сечение срезаемого слоя

Рисунок 5. – Схемы к определению параметров «мгновенного» сечения срезаемого слоя

Срезаемый слой будет формироваться по траектории резания и иметь форму «запятой», толщина которой будет зависеть от подачи на оборот S_0 и угла в плане ψ и изменяться в соответствии с изменением угла μ – угла контакта вершины лезвия инструмента с заготовкой в текущий момент времени, то есть $a = \mu$. В этом случае «мгновенная» длина контакта по дуге сферы, или путь лезвия инструмента за один оборот заготовки, будет равна

$$l = \frac{D_u}{n_2} \quad (1)$$

где D_u – диаметр инструмента; n_1 и n_2 – частота вращения соответственно инструмента и заготовки.

Площадь «мгновенного» сечения срезаемого одним лезвием слоя:

$$f = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot S_o \cdot t}{n_2} \quad (2)$$

где D_3 – диаметр заготовки, мм; S_o – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм.

При этом не учитывается площадь «гребешка» неровностей высотой h , составляющей менее 5% от общей площади сечения срезаемого слоя f .

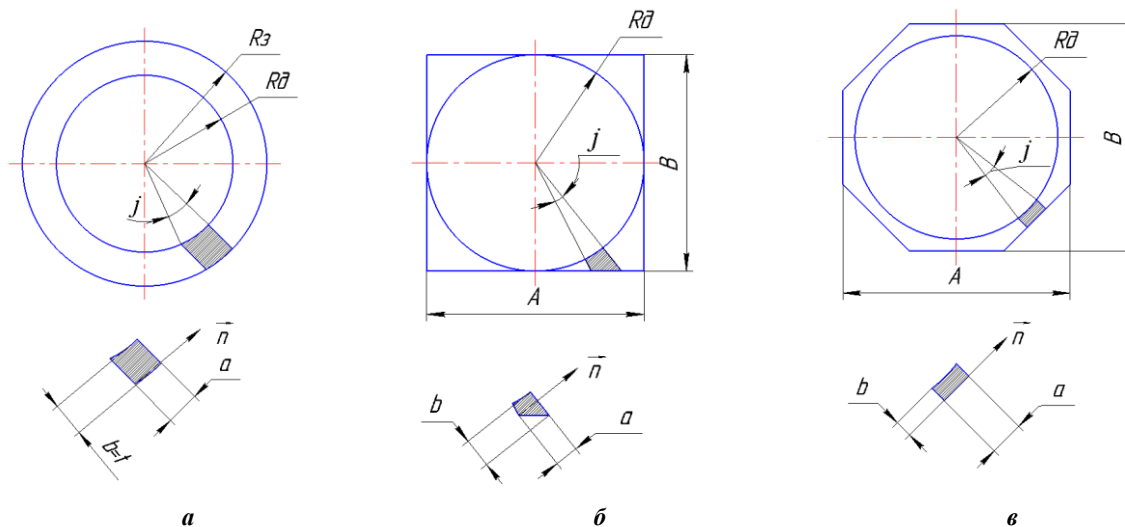
Объем резания слоя за один оборот главного движения резания

$$V_1 = \frac{f \cdot n_2}{\text{об}} \quad (3)$$

Удельный объем снятия слоя в движении подачи:

$$V_2 = \pi \cdot \dots \text{мин}^3 \quad (4)$$

В зависимости от формы исходной заготовки (сфера, цилиндр, конус) «мгновенное» сечение срезаемого слоя лезвием инструмента на переходе врезания будет иметь различную форму (рисунок 6): прямоугольника с двумя криволинейными сторонами (рисунок 6, а); трапеции с одной криволинейной стороной (рисунок 6, б); прямоугольника с одной криволинейной стороной (рисунок 6, в).



а – сфера; б – цилиндр; в – конус

Рисунок 6. – «Мгновенное» сечение срезаемого слоя при получении сферической поверхности детали из заготовок

Во всех случаях толщина и ширина срезаемого слоя определяются по формулам:

$$a = \dots \mu \varphi \quad (5)$$

$$b = \dots \sin \mu \varphi \quad (6)$$

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя определяется по формуле

$$f = \dots = \dots \quad (7)$$

Форма поперечного сечения срезаемого слоя зависит от угла в плане φ и формы режущей кромки (рисунок 7).

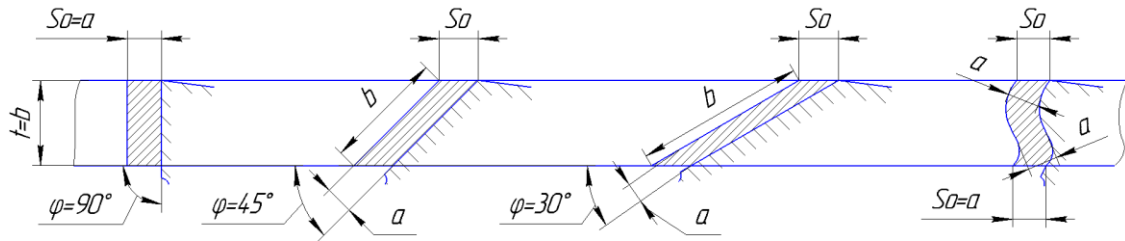


Рисунок 7. – Формы сечения срезаемого слоя в зависимости от величины угла в плане φ и формы режущей кромки

Как видно из рисунка 6, величина площади сечения срезаемого слоя $f = \dots$ независимо от формы его сечения остается постоянной. Поэтому с технологической точки зрения обработка заготовок в форме сферы, цилиндра или участками конуса будут характеризоваться одинаковой площадью сечения срезаемого слоя, определяемого подачей S_0 и глубиной резания t . Изменения толщины и ширины срезаемого слоя при изменении формы режущей кромки в данном случае не учитываются. Эти изменения следует учитывать при точных расчетах «мгновенного» сечения срезаемого слоя.

Расчет толщины и ширины сечения срезаемого слоя показывает (таблица 2), что они имеют малые значения, и с увеличением частоты вращения инструмента от 3200 мин^{-1} до 12000 мин^{-1} толщина сечения срезаемого слоя уменьшается примерно от 2 до 4 раз (рисунок 8, а). С увеличением минутной подачи инструмента толщина срезаемого слоя интенсивно увеличивается (рисунок 8, б).

Таблица 2. – Расчет толщины и ширины сечения срезаемого слоя

№ опыта	Частота вращения инструмента, мин^{-1}	Подача			Глубина резания, мм	Время обработки, с	Толщина, мм	Ширина, мм	Диаметр инструмента, мм
		минутная, мм/мин	на оборот, мм/об	на зуб, мм/зуб					
1	3200	1,183	0,0003697	0,0000616	1,335	71	0,0000615	1,3383	34,3
2	6400	0,633	0,0000989	0,0000165	0,93	38	0,0000164	0,93223	35,1
3	12050	0,583	0,0000484	0,0000081	0,685	35	0,0000081	0,6867	35,6

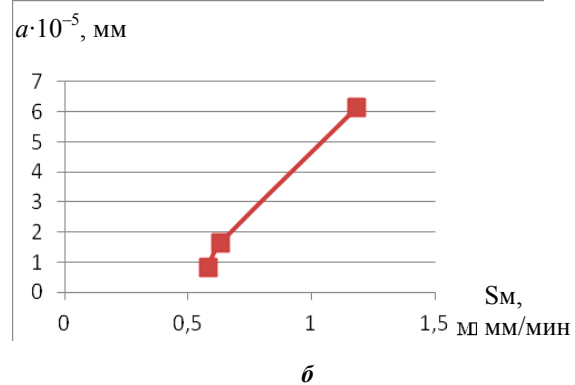
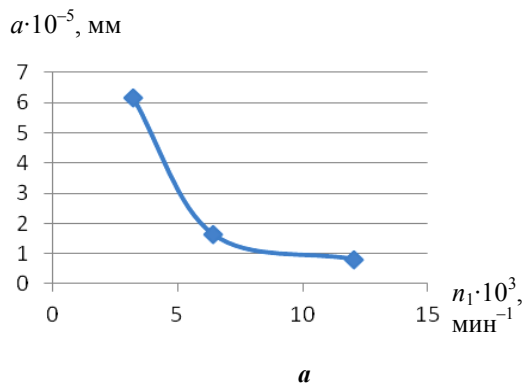


Рисунок 8. – Зависимость изменения толщины срезаемого слоя от частоты вращения (а), минутной подачи (б)

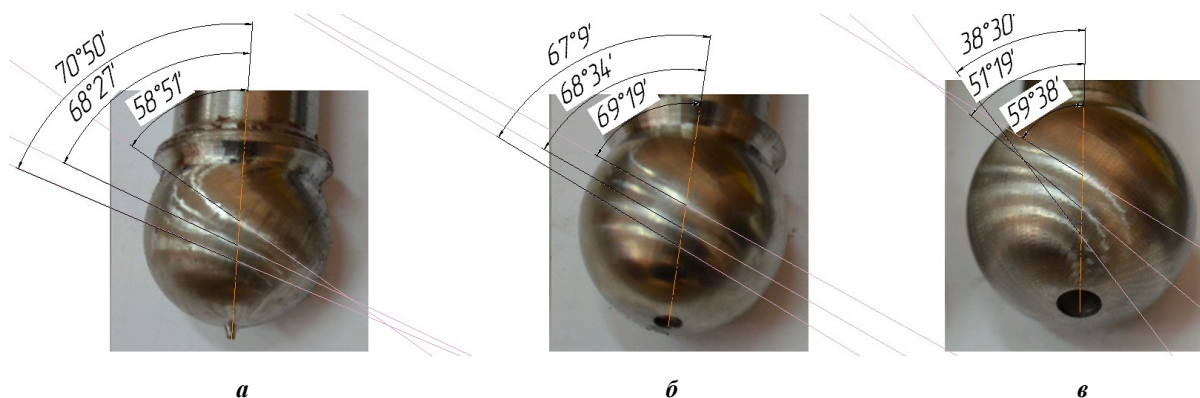
2. Технологические характеристики срезаемого слоя и обрабатываемой поверхности

Экспериментальные исследования стружки показывают, что на этапе врезания инструмента в заготовку она имеет ленточную форму вид (рисунок 9, а) длиной 3,5...7,5 мм и шириной 0,45...0,72 мм. На этапе выхаживания при больших значениях частоты вращения инструмента (12000 мин^{-1}) форма стружки – мелкодисперсная (пылевидная) (рисунок 9, б), а при затуплении инструмента и существенном возрастании температуры в зоне резания стружка «спекается» в виде капель (рисунок 9, в).



Рисунок 9. – Формы стружки на этапе врезания (а);
на этапе выхаживания (б), при работе затупленным инструментом (с)

Рассмотренные траектории резания, сечение срезаемого слоя и кинематические углы лезвия определяют формирование микрорельефа обработанной поверхности сферы (рисунок 10).



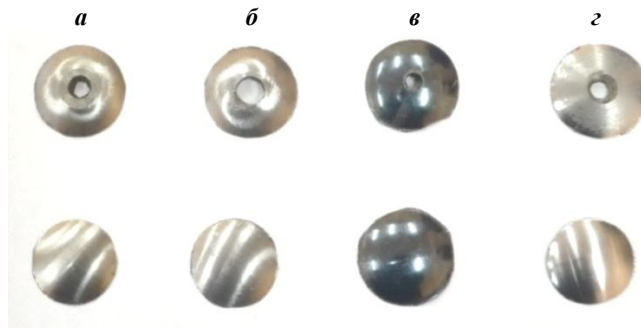
а – Ra 1,3 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 25 мм;
б – Ra 0,6 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 30 мм;
в – Ra 0,7 мкм при частоте вращения инструмента $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$, частоте вращения заготовки $n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$ и диаметре сферы 35 мм

Рисунок 10. – Шероховатость сферической поверхности детали и углы наклона линий равной шероховатости

На рисунке 10 видно, что поверхность сферы формируется в виде «сеточки» за счет пересечения траекторий движений детали и инструмента, а направление формирования одинаковых по высоте неровностей на поверхности определяется углом η наклона оси вращения детали по отношению к оси вращения инструмента и величиной скоростей вращения.

Угол наклона линий с одинаковой величиной неровностей находится в пределах $65 \dots 75^\circ$ при угле $\eta = 15 \dots 25^\circ$. Известно [6; 7], что снижению шероховатости обработанной поверхности способствует применение кругоспиральных фрез (борфрез) с углом наклона режущих кромок лезвий в данных пределах, а также ротационных инструментов, обеспечивающих угол наклона траектории резания $50 \dots 70^\circ$. Данный вывод подтверждает исследования сферической поверхности образцов на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 (рисунок 11).

На рисунке 12 четко видны неровности-риски по траектории резания, что обеспечивает низкую шероховатость поверхности в промежутке между рисками – траекториями (Ra 0,021...0,64 мкм). При этом отмечается повышение микротвердости поверхности в 1,5...3 раза по сравнению с основой – увеличение частоты вращения инструмента с 3000 до 6000 мин^{-1} приводит к увеличению микротвердости поверхности на 10...20% (таблица 3).



- а** – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$;
б – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$;
в – обработка с частотой вращения инструмента $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$;
 частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$;
г – обработка резцом на токарном станке с частотой вращения $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ и подачей $S_o = 0,2 \text{ мм/об}$
 (верхний ряд – вид поверхности вблизи оси вращения (полюса сферы);
 нижний ряд – вид поверхности на максимальном удалении от оси вращения (полюса сферы))

Рисунок 11. – Образцы для исследования на атомно-силовом микроскопе

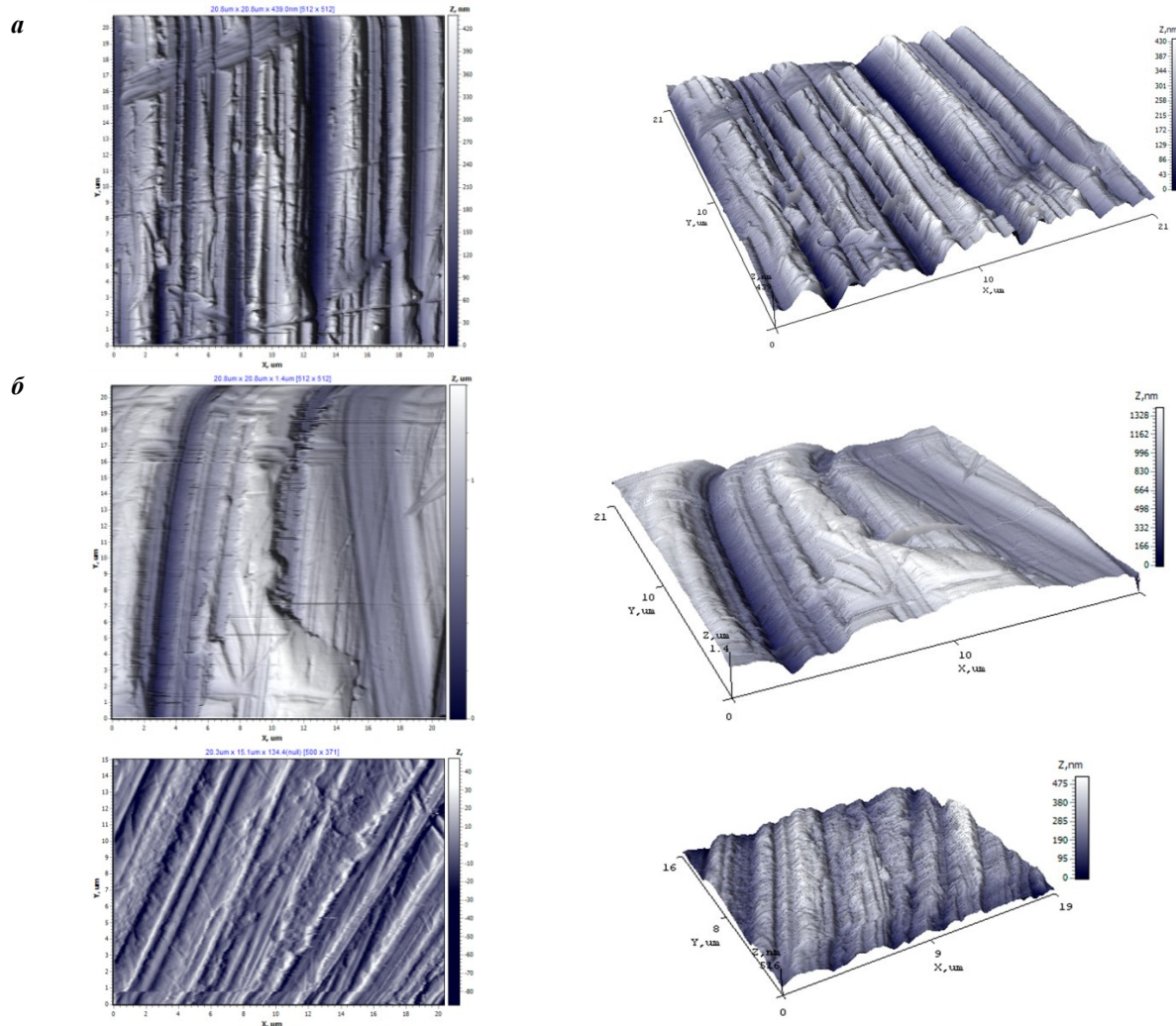


Рисунок 12. – Топография поверхности после обработки вращающимся инструментом (*а, б*); токарным резцом (*в*)

(см. также с. 23)

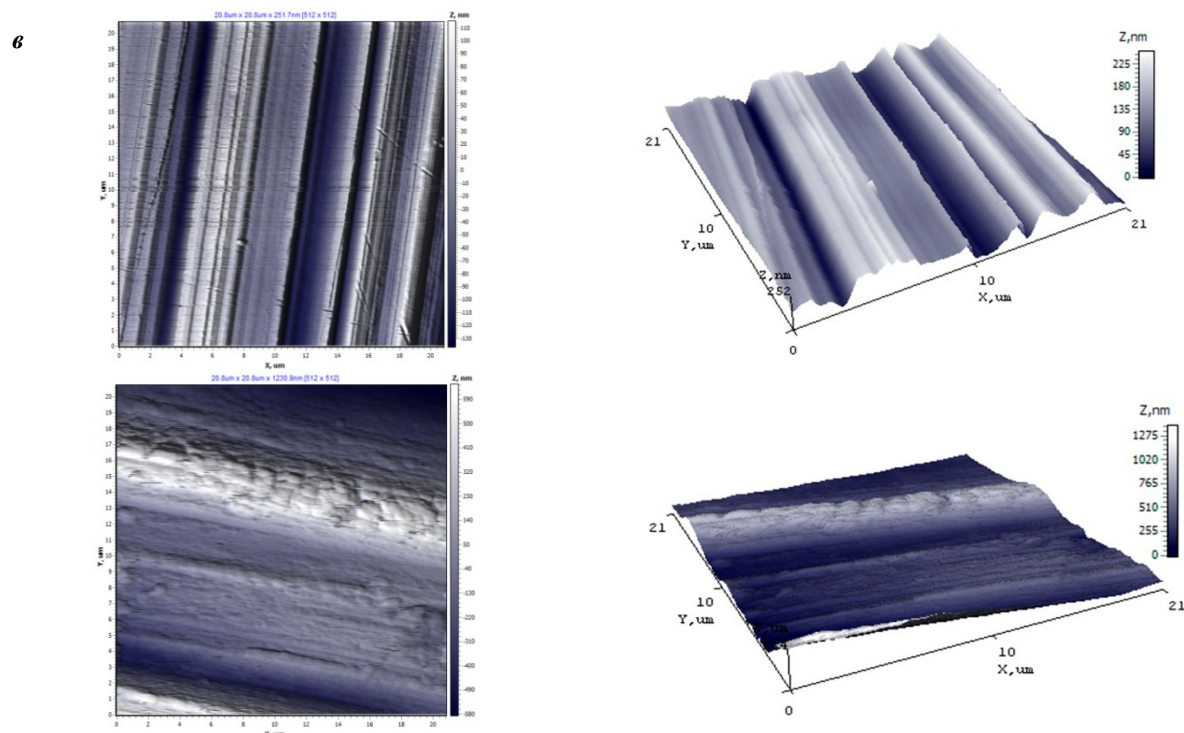


Рисунок 12. Окончание

Таблица 3. – Значение микротвердости поверхностей образцов

№ образца	Вид обработки	Режимы резания	Микротвердость, HV 0,025
Образец 1	вращающимся инструментом	$n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$	625
Образец 2			750
Образец 3	вращающимся инструментом	$n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 180 \text{ мин}^{-1}$	780
Образец 4			850 (твердость подложки 282 HV 10)
Образец 5	вращающимся инструментом	$n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}; n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$	515
Образец 6			525
Образец 7	токарным резцом	$n = 1200 \text{ мин}^{-1}; S_0 = 0,2 \text{ мм/об}$	565
Образец 8			390 (твердость подложки 278 HV 10)

С целью повышения качества деталей на сферическую поверхность, предварительно полированную, наносилось покрытие из TiN в вакуумной камере установки PVM-0,5FN. Нанесение покрытия обеспечивает снижение шероховатости поверхности по сравнению с поверхностью без покрытия примерно в 10 раз – с Ra 56,9...176,9 до Ra 5,647...12,031 (таблица 4). Причем по мере уменьшения плотности покрытия шероховатость повышается: образец А – Ra 5,647; 6,278; 12,031; образец Б – Ra 19,271; 10,970; 10,195; образец В – Ra 259,181; 29,945; 341,140

Таблица 4. – Шероховатость образцов с покрытием TiN

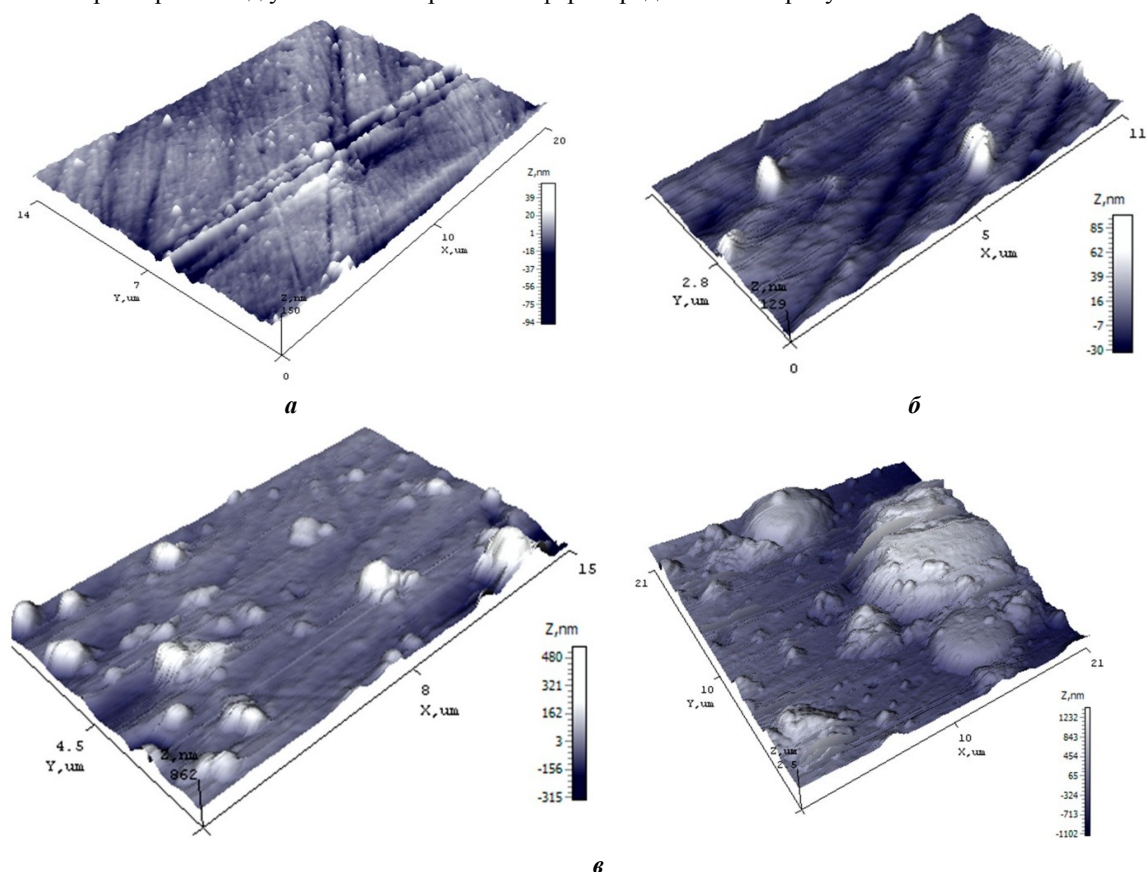
Образец А						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	5,647	5,380	6,278	4,457	12,031	6,457
Rq:	7,699	7,245	8,786	5,954	17,779	7,803
Образец Б						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	259,181	253,016	29,945	30,982	341,140	481,256
Rq:	316,278	306,588	52,396	41,530	406,016	507,758
Образец В						
Измерение	1		2		3	
	По площади	По сечению	По площади	По сечению	По площади	По сечению
Ra:	19,271	15,281	10,970	9,210	10,195	11,998
Rq:	29,292	25,509	20,590	15,324	18,832	22,289

Микротвердость различных участков сферы представлена в таблице 5. Участок с высокой плотностью покрытия имеет микротвердость 790...800 HV 0,01, с менее высокой плотностью покрытия – 750...760 HV 0,01 и малой плотностью покрытия – 650...660 HV 0,01.

Таблица 5. – Микротвердость участков сферы

Номер измерения	Маркировка образца	Микротвердость, HV 0,01
1	Образец А (блестящий)	802
2		747
3		815
4		797
Среднее значение микротвердости образца А		790...800
1	Образец Б (с отверстием)	797
2		747
3		747
4		731
Среднее значение микротвердости образца Б		750...760
1	Образец В (матовый)	656
2		634
3		647
4		673
Среднее значение микротвердости образца В		650...660

Характерный вид участков поверхности сферы представлен на рисунке 13.



а – образец А; б – образец Б; в – образец В

Рисунок 13. – Топография поверхности сферы с нанесенным покрытием TiN после обработки вращающимся инструментом

Сравнение данных значений микротвердости с микротвердостью сферы без покрытия (см. таблицу 5) показало, что покрытие обеспечивает повышение микротвердости в среднем на 100 HV 0,01.

Выводы:

1) формирование регулярного микрорельефа на сферических поверхностях контактируемых деталей путем применения комбинированной скоростной обработки вращающимся инструментом способствует улучшению эксплуатационных свойств узлов трения;

2) при комбинированной скоростной обработке сферической поверхности детали реализуются переходящие друг в друга трех- и двухэлементные кинематические схемы резания, соответствующие переходам врезания, выглаживания и выхаживания, что приводит к изменению положения в пространстве и величины результирующей скорости резания, оказывающей существенное влияние на характеристики процесса резания;

3) установлено, что траектории движения инструмента и детали при двух- и трехэлементной схеме резания пересекаются и образуют на сферической поверхности «сетчатый» рисунок;

4) сечение срезаемого слоя на различных переходах имеет разную форму, что оказывает влияние на форму остаточных неровностей (гребешков) на обработанной поверхности сферы. Определены параметры «мгновенного» сечения срезаемого слоя в главном движении резания и в движении подачи;

5) установлено, что при частоте вращения $12\,000\text{ мин}^{-1}$ и минутной подаче инструмента $0,6\text{ мм/мин}$ размеры толщины сечения стружки не превышают $0,8 \cdot 10^{-5}\text{ мм}$, а процесс резания сопровождается малыми деформациями срезаемого слоя, не оказывающими существенного влияния на деформацию микрорельефа поверхности сферы;

6) изменение в процессе резания направления вектора линейной скорости резания приводит к изменению кинематических углов в плане режущих лезвий, что влияет на формирование шероховатости обработанной поверхности. Установлено, что линии равной шероховатости на поверхности сферы наклонены под углом $65 \dots 75^\circ$ по отношению к оси вращения детали и имеют значения параметра шероховатости $Ra\ 0,6 \dots 1,2\text{ мкм}$. Исследования поверхности на атомно-силовом микроскопе подтверждают наличие линий пересечения траекторий движений инструмента и заготовки и снижение шероховатости в пределах этих линий до значения $Ra\ 0,02 \dots 0,64\text{ мкм}$;

7) улучшению эксплуатационных свойств сферических поверхностей способствует их полирование и нанесение в вакууме тонкопленочных покрытий TiN толщиной $5 \dots 10\text{ мкм}$. Установлено, что шероховатость поверхности с покрытием снижается в 10 раз по сравнению с шероховатостью без покрытия, а микротвердость поверхности повышается в $1,5 \dots 3$ раза по сравнению с основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1 : Теоретические основы. – 400 с.
2. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 248 с.
3. Чистосердов, П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. – Минск : Беларусь, 1977. – 127 с.
4. Анализ способов обработки сферических поверхностей / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
5. Попок, Н.Н. Ионно-лучевая обработка материалов азотом / Н.Н. Попок, С.В. Дербуш // Оборудование и инструмент для профессионалов : междунар. информ.-техн. журн. – 2009. – № 6. – С. 18–19.
6. Металлорежущие вращающиеся инструменты и оснастка : каталог Sandvik Coromant, 2015.
7. Попок, Н.Н. Шероховатость поверхности детали при обработке ротационным инструментом с прерывистой режущей кромкой / Н.Н. Попок // Машиностроение : сб. – Минск, 1990. – Вып. 15. – С. 18–22.

Поступила 02.08.2017

**KINEMATIC AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR FORMING
THE REGULAR MICRORELIEF OF SPHERICAL SURFACES
OF PARTS BY COMBINED CUTTING WITH CUTTING**

N. POPOK, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV, G. GVOZDZ, V. KUKAREKO

The kinematic features of the processing of spherical surfaces by a rotating tool at a high cutting speed, the formation of a cutting surface and a cut layer, and the angles of the blade in the cutting process are analyzed. The results of experimental studies of the physical characteristics of the cut sheet, microrelief and microhardness of the resulting surface of the component are presented, including after coating with TiN by the ion-plasma method, confirming a decrease in the height of irregularities and an increase in microhardness in comparison with the traditional methods of obtaining spherical surfaces.

Keywords: spherical surface, combined treatment, kinematic features, microrelief, microhardness.