

УДК 621.91.01/02

*Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, В. С. Анисимов, Г. И. Гвоздь*

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

UDC 621.91.01/02

*N. N. Popok, R. S. Hmelnicky, V. S. Anisimov, G. I. Gvozdz*

## INTEGRATED RESEARCH OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF SPHERICAL SURFACES TREATMENT

### Аннотация

Рассмотрены методика и результаты экспериментальных исследований процесса обработки сферических поверхностей деталей, приведены данные по деформации срезаемого слоя, мощности резания и вибрациям, проанализированы зависимости температуры резания, износа инструмента, точности и качества полученных поверхностей от режимов обработки, выработаны рекомендации по фрезерованию сферических поверхностей деталей.

### Ключевые слова:

обработка сферических поверхностей, фрезерование сферических поверхностей, результаты экспериментальных исследований, деформация срезаемого слоя, мощность резания, вибрация, температура резания, износ лезвия инструмента, точность, шероховатость.

### Abstract

The technique and results of the experimental studies dealing with processing of spherical surfaces of parts are presented; the data on deformation of the layer being cut, cutting power and vibrations are given; the dependencies between the cutting temperature, tool wear, accuracy and quality of the obtained surfaces and the processing conditions are analyzed; the recommendations for milling spherical surfaces of components are made.

### Key words:

processing of spherical surfaces, milling of spherical surfaces, results of experimental studies, deformation of cut layer, cutting power, vibration, cutting temperature, tool blades wear, precision, surface roughness.

### Введение

В технике находят широкое применение детали с неполными сферическими поверхностями, такие как палец шаровой опоры рычага автомобиля, шаровая заглушка запорной арматуры, шар рукоятки переключения механизмов машин и др. Эти детали отличаются габаритами, требованиями к их точности, качеству и надёжности. В связи с этим для их изготовления используют литье и методы обработки давлением,

резанием [1–5]. Существует проблема выбора метода, в полной мере удовлетворяющего этим требованиям. Для повышения качества и точности получения сферических поверхностей чаще всего применяют методы резания, например, лезвийные, абразивные, электрохимические и др. Применение лезвийной обработки наиболее предпочтительно, т. к. она обеспечивает высокую производительность и точность, исключает прижоги и шаржирование абразивными

зёрнами обработанной поверхности, насыщение поверхностей химическими веществами. Для этих целей всё шире используется фрезерование [6, 7] на скоростях резания, сопоставимых со скоростями абразивной обработки. Повышение скорости резания в десятки раз по сравнению с традиционной ставит задачи выбора её рациональных значений с точки зрения обеспечения оптимальной геометрии лезвия, благоприятных деформационных процессов и стружкообразования в зоне резания, уменьшения теплового воздействия на обрабатываемую поверхность, повышения точности и снижения шероховатости сферы, увеличения износостойкости режущего инструмента. В связи с этим комплексные исследования особенностей фрезерования сферических поверхностей деталей на высоких скоростях резания с целью обеспечения требуемых показателей качества и точности обработанной поверхности при высокой производительности являются актуальными.

### Методика и результаты комплексных исследований

С целью всестороннего изучения процесса резания сферических поверхностей деталей фрезерованием и сопоставления результатов экспериментов проводятся одновременные исследования фактической частоты вращения инструмента и заготовки, силы тока в электрической цепи станка, температуры в зоне резания, шероховатости сферической поверхности детали, точности исполняемого размера детали.

Обработки фрезерованием выполняются на универсально-заточном станке модели 3М642, имеющем двухступенчатый скоростной привод (первая ступень –  $3150 \text{ мин}^{-1}$ , вторая ступень –  $6300 \text{ мин}^{-1}$ ) и оснастку для ручного и механического вращения заготовки.

Используются концевые фрезы диаметрами 25, 30, 35 мм (рис. 1, а–в), а также сборные фрезы диаметром 30 мм (рис. 1, г).

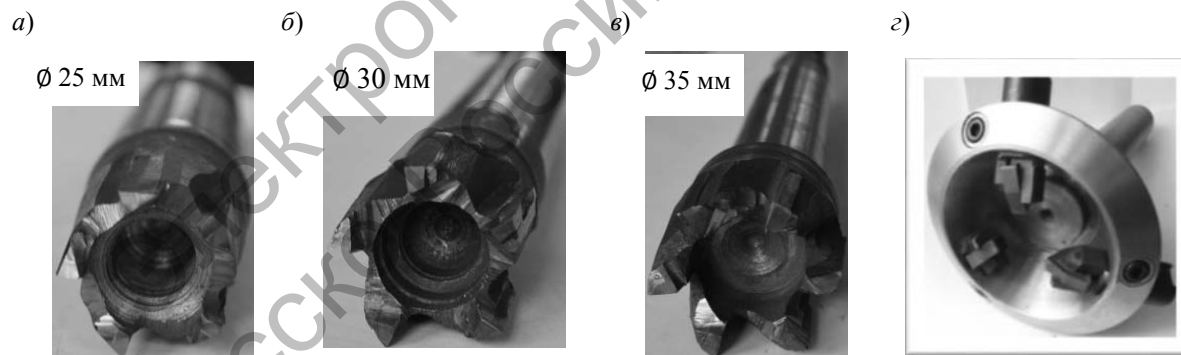


Рис. 1. Фрезы для обработки сферических поверхностей деталей: а, б, в – концевые напайные фрезы; г – сборная фреза

Обрабатываются заготовки из стали 40Х ГОСТ 4543 (рис. 2).

Для сравнения производится обработка сфер резцом Pafana SVJCR 2020 11 на токарном станке модели 16K20Ф3, оснащённом УЧПУ Sinumerik 802D

фирмы «Сименс» (Siemens).

Измерение фактических частот вращения инструмента, закрепленного на валу шпинделя станка, и заготовки, установленной на валу приспособления, проводится при помощи тахометра

ТЭ-02 при различных диаметрах фрез на холостом и рабочих ходах, а затем полученные значения сравниваются с паспортными характеристиками станка.

Мощность резания рассчитывается на основании измерений тока в электрической цепи станка при помощи токоиз-

мерительных клещей Mastech M266, а также измеряется с использованием частотных преобразователей Yaskawa V1000 и Omron MX-2 на первой и второй ступенях привода станка при различных диаметрах фрез на холостом и рабочем ходах.



Рис. 2. Заготовки

Температура сферической поверхности детали определяется бесконтактным методом с помощью пирометра Optris LS, а также калориметром (рис. 3) оригинальной конструкции с электронным термометром Eliwell ID974 (в эксперименте принимал участие ст. преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства» Полоцкого государственного университета А. В. Сидикевич). Измерение температуры обрабатываемой сферической поверхности заготовки пирометром осуществлялось периодически, с интервалом времени 0,05 с.

Оценка шероховатости сферической поверхности производится методом сравнения с эталонными образцами шероховатости и измерением на модернизированном профилографе-профилометре «Абрис ПМ7».

Для измерения диаметра сферы обрабатываемых заготовок используют-

ся микрометры МК25-1 и МК50-1 ГОСТ 6507. Схемы измерения диаметра сферы заготовок в вертикальной и наклонной плоскостях представлены на рис. 4.

Характерными чертами износа лезвий фрезы являются фаска и скол. Измерения их величины производятся на инструментальном микроскопе модели БМИ-1Ц с 5-кратным увеличением линзы.

Вибрации в процессе резания измеряли в трех плоскостях посредством виброметра «Октава-101ВМ», рабочий элемент которого закрепляли на корпусе приспособления, обеспечивающего вращение заготовки.

В ходе эксперимента на токарном станке с ЧПУ измеряется температура и оценивается шероховатость полученной поверхности.

Измерения силы тока в электрической цепи станка показали (рис. 5), что

при увеличении диаметра фрезы с 25 до 35 мм и частоты вращения с 3383 до 6750 мин<sup>-1</sup> сила тока возрастает в среднем на 0,2...0,4 %, а по сравнению с холостым ходом станка возрас-

тает на 4,5...9,1 % при частоте вращения 3383 мин<sup>-1</sup> и на 4,3...8,7 % при частоте вращения 6750 мин<sup>-1</sup>. Это объясняется увеличением силы резания и крутящего момента на фрезе.

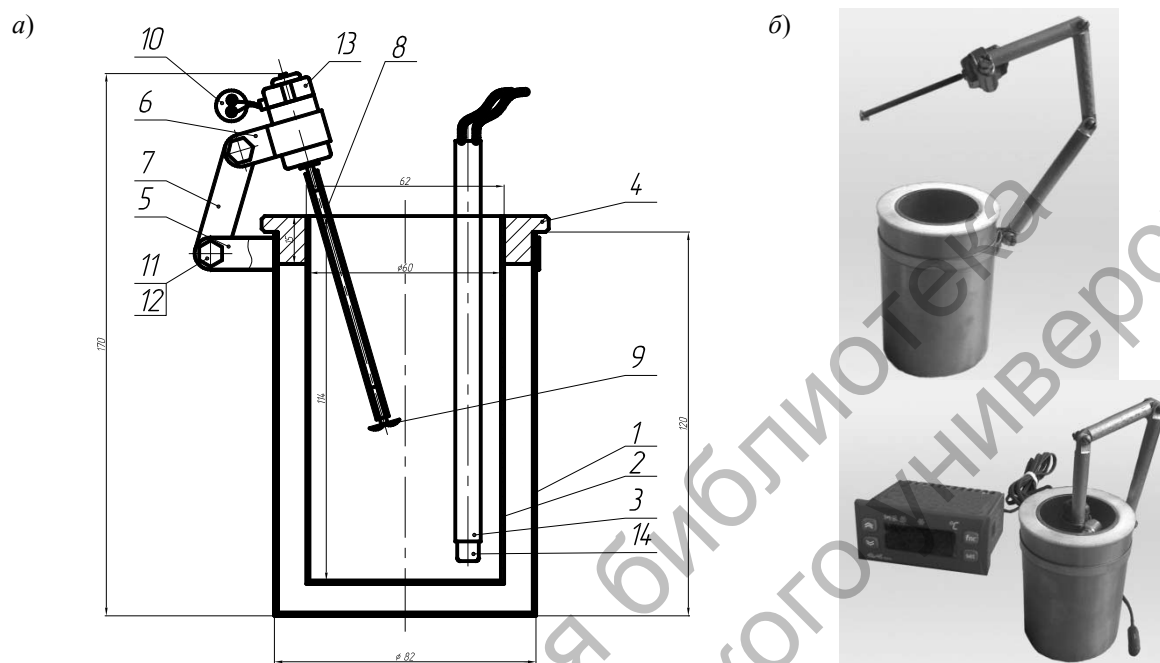


Рис. 3. Калориметр: а – эскиз; б – общий вид; 1 – наружный стакан; 2 – внутренний стакан; 3 – трубка термопары; 4 – крышка; 5, 6 – хомуты; 7 – рычаг; 8 – трубка; 9 – гребной винт; 10 – питание (1,5 В); 11 – болт; 12 – гайка; 13 – моторчик

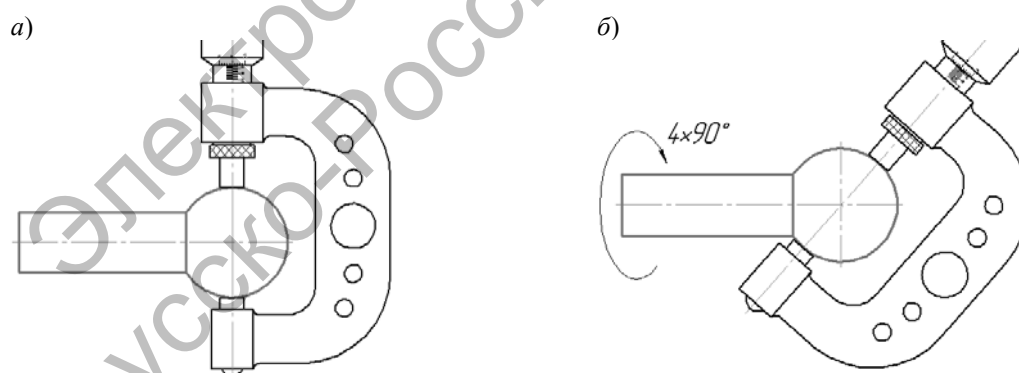


Рис. 4. Схемы измерения диаметра сферы заготовки: а – в вертикальной плоскости; б – в наклонной плоскости в четырех сечениях

Установленный эффект повышения силы тока в электрической цепи станка подтверждает проведённые измерения частоты вращения фрезы, которые показали, что на первой скорости (рис. 6, а) её значение на рабочем ходу

(3350 мин<sup>-1</sup>) несколько ниже, чем на холостом ходу (3390 мин<sup>-1</sup>) и в обоих случаях выше паспортных данных. Частота вращения фрезы в этом случае не зависит от диаметра инструмента. При обработке на второй скорости качествен-

ные соотношения частот вращения такие же, как и в первом случае, но при увеличении диаметра инструмента

с 25 до 35 мм, частота на рабочем ходу снижается примерно на 3 % (рис. 6, б).

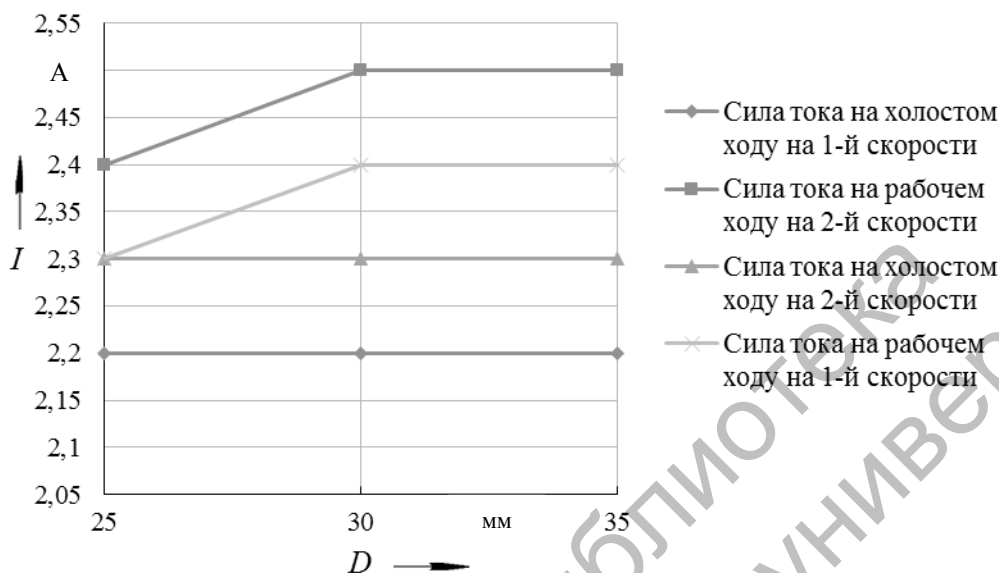


Рис. 5. Зависимость изменения силы тока  $I$  от диаметра инструмента  $D$

Пересчет значений изменяющихся частот вращения фрезы при изменении её диаметра в значения линейной скорости вращения показывает, что при уменьшении частоты вращения на 3 % увеличение диаметра фрезы с 25 до 35 мм приводит к увеличению линейной скорости на 26 %. При этом сила тока в электрической цепи станка возрастает всего на 4 %. Это значит, что влияние значительного увеличения линейной скорости вращения фрезы компенсируется снижением силы резания, т. к.  $N = PzV$ .

При исследовании деформации срезаемого слоя установлено, что коэффициент утолщения стружки  $K_a$  изменяется в пределах 1,1...1,87, коэффициент уширения  $K_b$  — 0,61...1,21 и относительный сдвиг  $\varepsilon$  — 2,01...2,4. Полученные соотношения параметров  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $\varepsilon$  соответствуют общепринятым данным по деформации срезаемого слоя при других видах обработки конструкционных углеродистых сталей в случаях реализации несвободного резания и имеют несколько

меньшие значения, что свидетельствует о более благоприятных условиях деформации срезаемого слоя при фрезеровании сферических поверхностей.

При определении температуры стружки методом калориметрирования установлено, что её значения находятся в пределах 410...460 °С.

Температура детали, измеренная пирометром, изменяется в зависимости от частот вращения и диаметров инструмента и заготовки от 60 до 120 °С. Типичные зависимости изменения температуры детали от времени обработки представлены на рис. 7 и 8.

При обработке острозаточенной фрезой наблюдается (см. рис. 8) существенное отличие интенсивности изменения температуры при увеличении поперечной подачи и частоты вращения инструмента (от 0,25 до 0,8 град/с). Причем по мере затупления режущих кромок лезвия инструмента интенсивность изменения температуры нарастает.



Рис. 6. Зависимость частоты вращения инструмента  $n$  от его диаметра  $D$ : а – на 1-й скорости; б – на 2-й скорости

При обработке фрезой с затупленными режущими кромками лезвия инструмента (рис. 9) отличия интенсивности изменения температуры незначительны (от 0,77 до 0,87 град/с). По мере увеличения фаски износа по задней поверхности лезвия фрезы тепловые потоки в инструмент и деталь увеличиваются, о чём свидетельствует рост температуры нагрева детали до 120 °С. При этом влияние поперечной подачи (глубины резания или ширины сечения срезаемого слоя) как

фактора, улучшающего теплоотвод в стружку, снижается. При достижении величины фаски износа более 4 мм наблюдается резкое увеличение температуры до 300...400 °С за короткий промежуток времени (10...15 с) и катастрофический износ лезвия инструмента.

Измерение температуры при обработке сферической поверхности на токарном станке с ЧПУ показывает (см. рис. 9), что её значения примерно такие же, как и при фрезеровании, а интенсивность нарастания несколько ниже

за счёт увеличения времени обработки. Однако при точении наблюдаются резкие увеличения температуры в зоне из-

мерения от 120 до 150 °С при накручивании стружки на деталь.

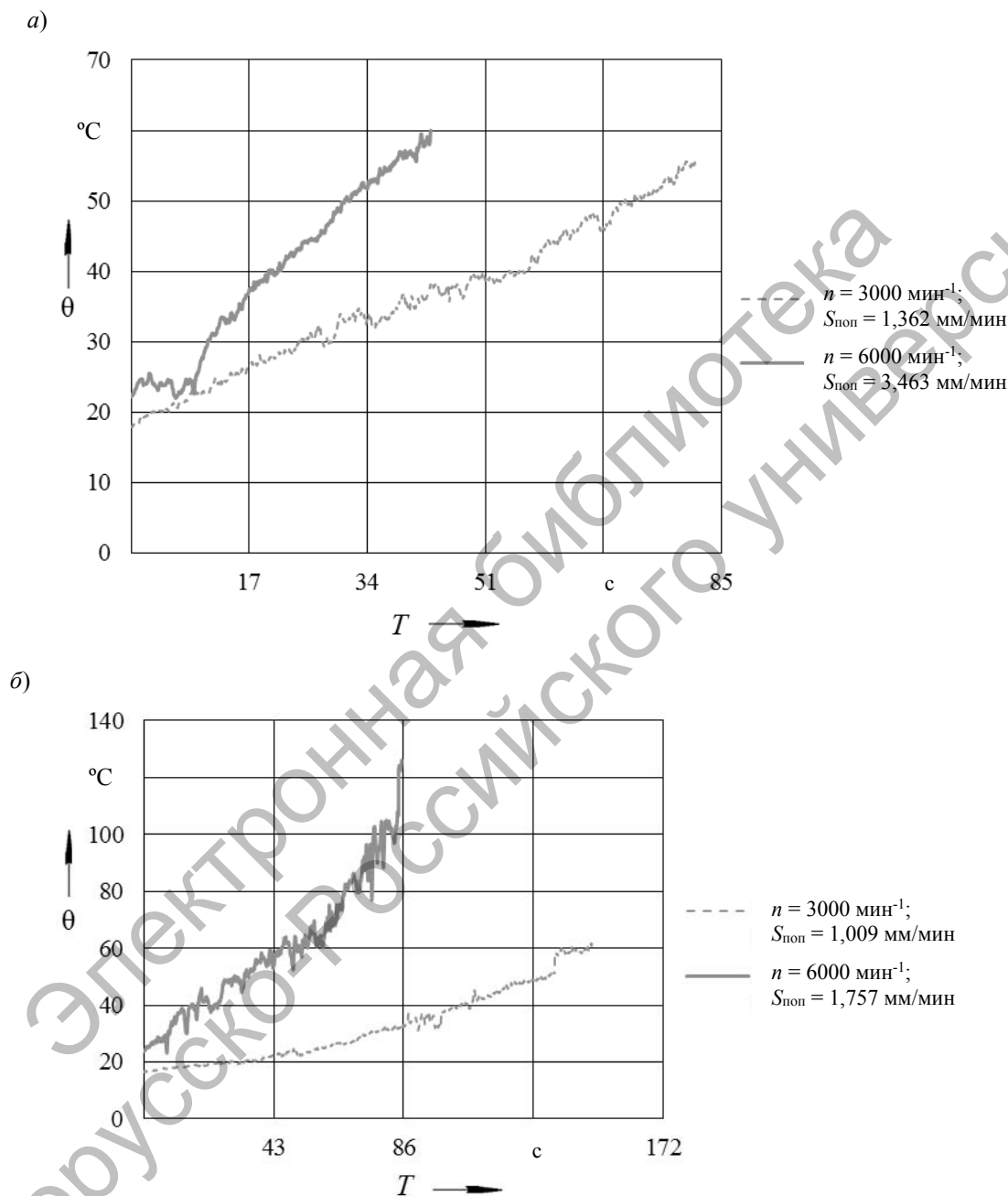


Рис. 7. Зависимости изменения температуры детали от времени обработки при различных значениях частоты вращения и поперечной подачи: а – сферической поверхности диаметром 25 мм; б – сферической поверхности диаметром 30 мм

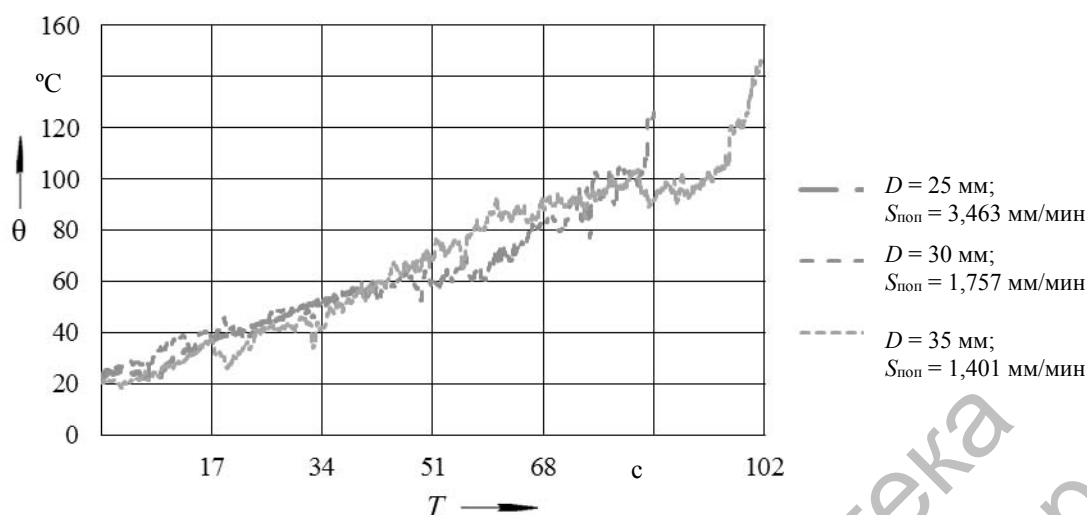


Рис. 8. Зависимости изменения температуры детали от времени обработки при частоте вращения инструмента  $6000 \text{ мин}^{-1}$  и различных диаметрах сферических поверхностей и поперечной подачи

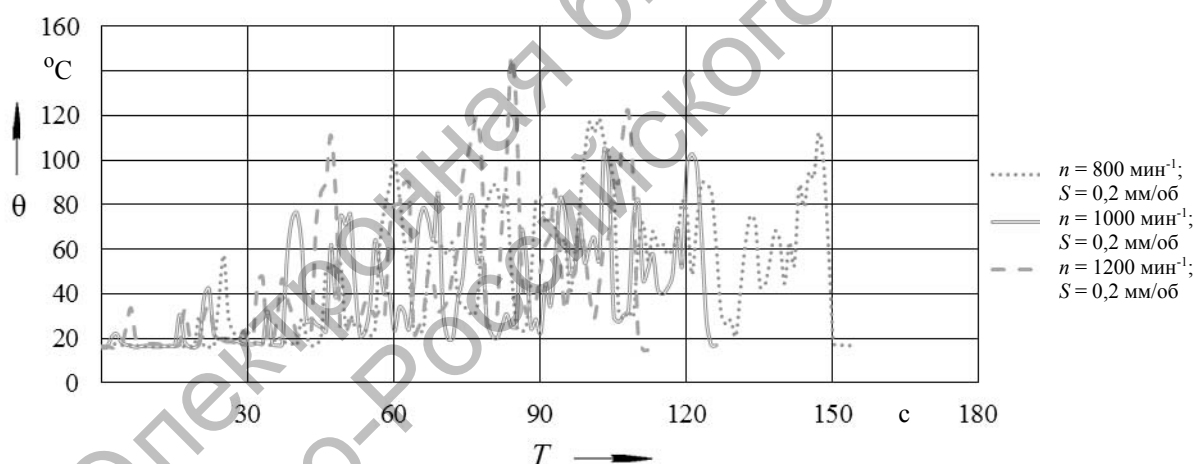


Рис. 9. Зависимости изменения температуры детали от времени обработки при точении сферической поверхности диаметром 37 мм

Сравнительно невысокие значения температуры нагрева детали ( $60 \dots 120^\circ\text{C}$ ) свидетельствуют о том, что в поверхностных слоях детали и лезвия инструмента не происходит каких-либо существенных структурных и фазовых превращений, а также изменений остаточных напряжений, что обеспечивает высокое качество обработанной поверхности сферы.

Исследование шероховатости сферической поверхности подтверждает этот вывод. После фрезерования шероховатость поверхности  $Ra = 0,6 \dots 1,2 \text{ мкм}$ , причем чем больше частота вращения инструмента и меньше частота вращения детали, тем шероховатость ниже. Также установлено, что шероховатость поверхности ниже вблизи оси вращения заготовки, т. к. значения подачи (линей-

ная скорость вращения детали) минимальны, а частота вращения фрезы неизменна.

Сравнительные исследования шероховатости поверхности при обработке сферы токарным резцом на станке с ЧПУ при скорости резания 70 м/мин показывают, что значения параметра шероховатости на разных участках сферы получаются различными (рис. 10, а) и несколько

выше ( $Ra = 1,6 \dots 6,3$  мкм), чем при фрезеровании. Это объясняется изменением углов в плане острогаченого резца и образованием нароста. При увеличении скорости резания до 140 м/мин и снижении подачи до 0,2 мм/об обеспечивается шероховатость в пределах  $Ra 1,6$  почти на всей поверхности сферы (рис. 10, б) за исключением участка поверхности вблизи осевой линии детали ( $Ra 6,3$ ).

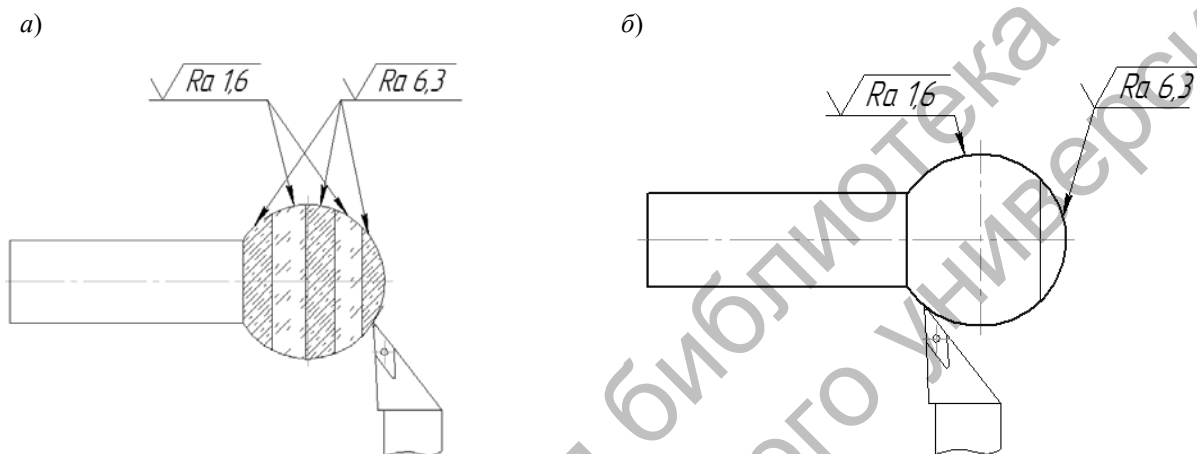


Рис. 10. Типичная картина шероховатости поверхности при точении на скоростях: а – 70 м/мин; б – 140 м/мин

Снижение скорости резания до нулевого значения на осевой линии приводит к явлению наростообразования и повышению шероховатости.

Установленный эффект снижения шероховатости на участке сферической поверхности заготовки, расположенном вблизи оси вращения, позволяет рекомендовать данный метод формообразования для деталей, у которых сферическая поверхность вблизи оси вращения является рабочей, например у подпятника вала погружного насоса, у вала поршня экструдера и т. п.

Анализ результатов измерения диаметров сферы показывает, что отклонение размеров находится в пределах 0,01...0,21 мм, причем чем выше диаметр сферы и частота вращения заготовки, тем меньше отклонение. Изменения размеров объясняются неточно-

стью установки оси вращения фрезы относительно оси заготовки. Как показывают измерения и расчёты, для повышения точности сферических поверхностей угловые отклонения осей вращения детали и фрезы должны находиться в пределах 15...30 мин.

На качество и точность обработки существенное влияние оказывают вибрации в зоне резания. Исследования вибраций показали, что их средний уровень находится в пределах допустимых значений 80...90 дБ. При этом отмечены наибольшие колебания вдоль оси вращения детали и в направлении действия силы резания.

После обработки фрезы имеют характерные фаски и сколы на режущих кромках и поверхностях лезвий (рис. 11). Измерения износа зубьев после обработки деталей диаметром 25,

30 и 35 мм при частоте вращения фрезы 3150 и 6300 мин<sup>-1</sup> показывают, что он возрастает в среднем на 10...60 %. Причем на величину фаски и сколов большое влияние оказывает угол заострения режущего клина  $\beta$ . Уменьшение  $\beta$  с 70 до 50 град приводит к увеличению раз-

меров сколов и фаски износа. Установлено, что при достижении размера фаски износа по высоте 0,2...0,4 мм и длине 2...4 мм фреза обеспечивает качественную обработку поверхностей деталей.

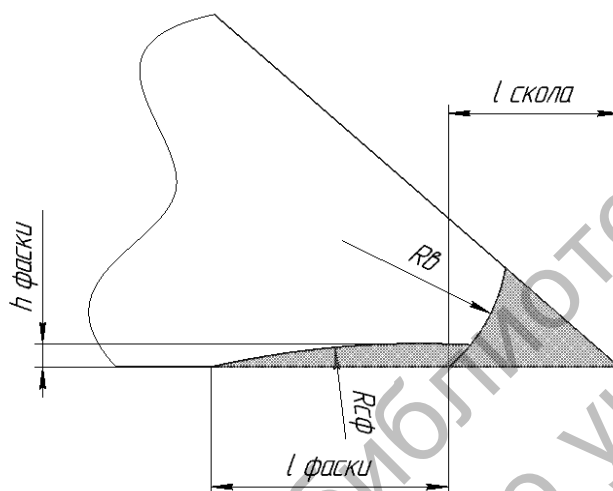


Рис. 11. Типичная картина изношенной части зубьев фрезы

### Заключение

Фрезерование сферических поверхностей деталей на повышенных скоростях резания имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной обработкой на токарных станках с ЧПУ:

- обеспечивает снижение шероховатости сферы на наиболее ответственных её рабочих участках до  $Ra = 0,6...1,2$  мкм за счёт снижения значений круговой подачи детали;
- уменьшает деформацию срезаемого слоя в 1,5...2 раза, незначительно повышает мощность резания на рабочем ходу и обеспечивает уровень вибрации в пределах допустимых значений, что свидетельствует о благоприятных условиях резания;
- значения температуры при фрезеровании такие же, как и при точении,

однако интенсивность её нарастания выше за счёт увеличения поперечной подачи. При этом в стружку поступает около 75 % теплоты и температура нагрева поверхности детали остаётся в пределах 60...120 °С, что гарантирует неизменность структуры и фазового состава в поверхностном слое детали;

– возрастает диапазон допустимых значений фаски износа лезвия фрезы до высоты 0,2...0,4 мм и длины 2...4 мм по сравнению с 0,8...1 мм токарного резца при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности;

– при отклонениях углового положения осей вращения фрезы и детали в пределах 15...30 мин обеспечивается высокая точность формы сферы с отклонением размера диаметра не более 0,01...0,2 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ способов обработки сферических поверхностей деталей / Н. Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
2. Хмельницкий, Р. С. Способы механической обработки наружной поверхности сферы / Р. С. Хмельницкий, Г. И. Гвоздь, В. В. Спектор // Тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – Вып. 31. – С. 134–137.
3. Попок, Н. Н. Способы обработки сферических поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, Г. И. Гвоздь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – Т. 2. – С. 315–319.
4. Хмельницкий, Р. С. Анализ конструкций технологического оснащения для точения выпуклых сферических поверхностей на универсальных токарных станках / Р. С. Хмельницкий, А. С. Максимчук // Тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – Вып. 68. – С. 89–91.
5. Хмельницкий, Р. С. Анализ конструкций технологического оснащения для точения вогнутых сферических поверхностей на универсальных токарных станках / Р. С. Хмельницкий, А. С. Максимчук // Тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – Вып. 68. – С. 92–94.
6. Моделирование влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента / Н. Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 28–38.
7. The theoretical fundamentajs of high-speed milling / A. Kudelko [et. al.] // Material of junior researchers' conference, Novopolotsk, 28–29 april 2010 : in 2 p. – Novopolotsk : Polotsk State University, 2010. – P. 2, iss. 2. – P. 88–91.

*Статья сдана в редакцию 30 марта 2017 года*

**Николай Николаевич Попок**, д-р техн. наук, проф., Полоцкий государственный университет.  
E-mail: rorctt@mail.ru.

**Руслан Сергеевич Хмельницкий**, ст. преподаватель, Полоцкий государственный университет.  
E-mail: xrs@tut.by.

**Виталий Сергеевич Анисимов**, магистрант, Полоцкий государственный университет.  
E-mail: anisimov\_1991@list.ru.

**Галина Игоревна Гвоздь**, ассистент, Полоцкий государственный университет.  
E-mail: halinahvozdz@mail.ru.

**Nikolay Nikolayevich Popok**, DSc (Engineering), Prof., Polotsk State University. E-mail: rorctt@mail.ru.

**Ruslan Sergeyeovich Hmelnicky**, senior lecturer, Polotsk State University. E-mail: xrs@tut.by.

**Vitali Sergeyeovich Anisimov**, MSc student, Polotsk State University. E-mail: anisimov\_1991@list.ru.

**Galina Igorevna Gvozdz**, assistant lecturer, Polotsk State University. E-mail: halinahvozdz@mail.ru.