

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ****SOME FEATURES OF SPHERICAL AND CONICAL SURFACES TREATMENT OF DETAILS ON CNC MACHINES**

**Н.Н. Попок\*, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов**  
 Полоцкий государственный университет

УДК 621.91.01/02  
**N. Popok\*, R. Hmelnicky, V. Anisimov**  
 Polotsk State University

**РЕФЕРАТ**

*ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА, СТАНОК С ЧПУ, УПРАВЛЯЮЩАЯ ПРОГРАММА, ТОЧЕНИЕ КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ТОЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ПРИВЕДЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ, ШЕРОХОВАТОСТЬ*

*Объект исследования – обработка конических и сферических поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ.*

*Целью работы является выработка рекомендаций по обработке сферических и конических поверхностей деталей на станках с ЧПУ.*

*Рассматривается токарная обработка конических и сферических поверхностей деталей. Выбрана и рассмотрена рациональная схема (последовательность) снятия припуска, сочетание значений линейных скоростей движений заготовки и инструмента, которые являются актуальными при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ. Введен параметр приведенной интенсивности изменения температуры. Приведены результаты измерения шероховатости обработанной поверхности детали при различных базовых длинах измерений.*

**ABSTRACT**

*TURNING, CNC MACHINE, CONTROL PROGRAM, TURNING OF CONICAL SURFACE, TURNING OF SPHERICAL SURFACE, CUTTING SPEED, TEMPERATURE, REDUCED INTENSITY FACTOR, ROUGHNESS*

*Turning of conical and spherical surfaces of the parts is reviewed. Rational scheme (sequence) of stock removal, the combination of values of linear velocities of the workpiece and tool movements that are relevant in the development of control programs for CNC machines is selected and considered. The parameter of given temperature change rate is introduced. The results of measurements of the machined surface roughness of the parts with different base length measurement are given.*

Токарная обработка конических и сферических поверхностей деталей характеризуется переменной скоростью главного движения резания (вращение заготовки) и наличием продольного, поперечного и криволинейного движений подачи инструмента в связи изменением диаметра заготовки [1].

Выбор рациональной схемы (последователь-

ности) снятия припуска на черновых и чистовых переходах и сочетания значений скоростей движений заготовки и инструмента является актуальным при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ [2]. Рассмотрим решение данной задачи на примере обработки конической поверхности детали «Штырь» (рисунок 1 а) и сферической поверхности детали «Палец ша-

\* E-mail: [rorctt@mail.ru](mailto:rorctt@mail.ru) (N. Popok)

ровой» (рисунок 1 б) в условиях единичного и мелкосерийного производств.

Обработка проводится на модернизированном токарном станке модели 16К20 с системой ЧПУ фирмы Siemens с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и без нее. Используются резец для контурной обработки фирмы Raflana SVJCR 2020K-11 и заготовки из круглого проката в стадии поставки для детали «Штырь» (рисунок 2 а) и предварительно обработанные для детали «Палец шаровой» (рисунок 2 б). В качестве контролируемых параметров приняты температура обрабатываемых поверхностей деталей, измеряемая пирометром модели Opttris Lager Sight, и шероховатость обработанной поверхности, измеряемая профилометром-профилографом модели Abris PM-7.

При написании управляющей программы обработки детали «Штырь» принята схема последовательного съема припуска с наибольшего

размера по длине к наименьшему за счет продольной подачи. За каждый проход снимается слой материала глубиной резания 1 мм. При этом резец имеет установочные движения в продольном и поперечном направлениях (рисунок 3 а). На рисунке указаны длина и время каждого прохода режущего инструмента, а также значения подачи на отдельных проходах и общее время обработки.

При обработке детали «Палец шаровой» съём припуска осуществляется или по схеме последовательной продольной и поперечной подачи инструмента на черновом переходе и подачи по дуге на чистовом переходе (рисунок 3 б), или по схеме подачи инструмента по дуге с изменяющимся радиусом при каждом последующем рабочем ходе с глубиной резания 0,8 мм (рисунок 3 в).

При обработке конической поверхности принято ступенчатое изменение скорости резания,

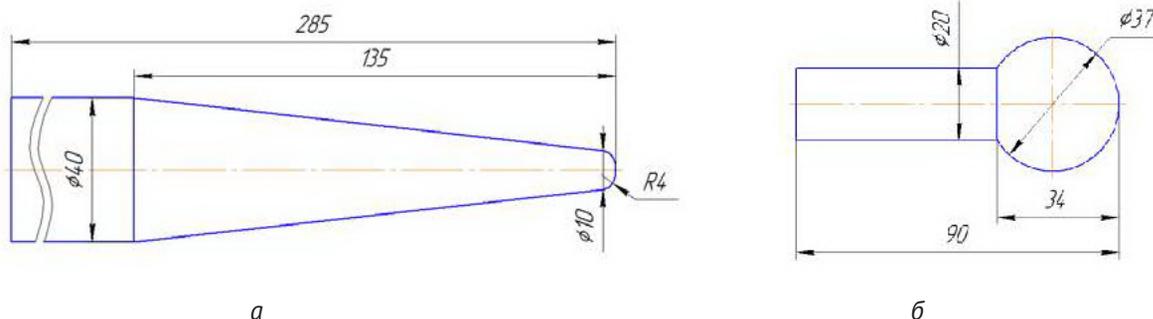


Рисунок 1 – Детали: а) «Штырь», б) «Палец шаровой»

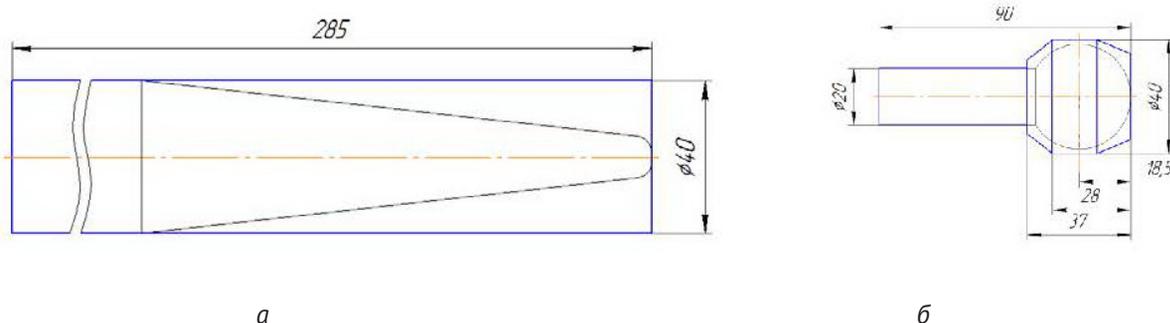


Рисунок 2 – Заготовки деталей: а) «Штырь», б) «Палец шаровой»

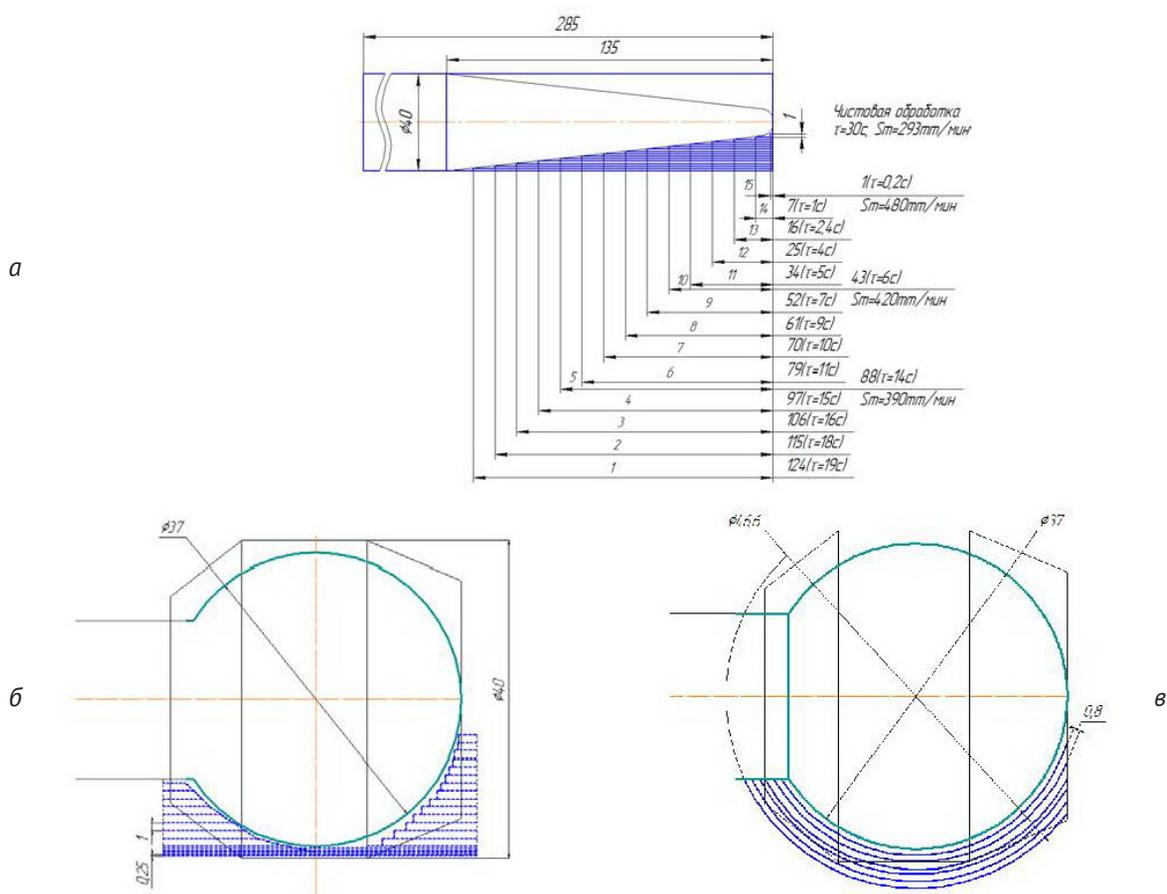


Рисунок 3 – Последовательность съема припуска при изготовлении деталей: а) «Штырь», б), в) «Палец шаровой»

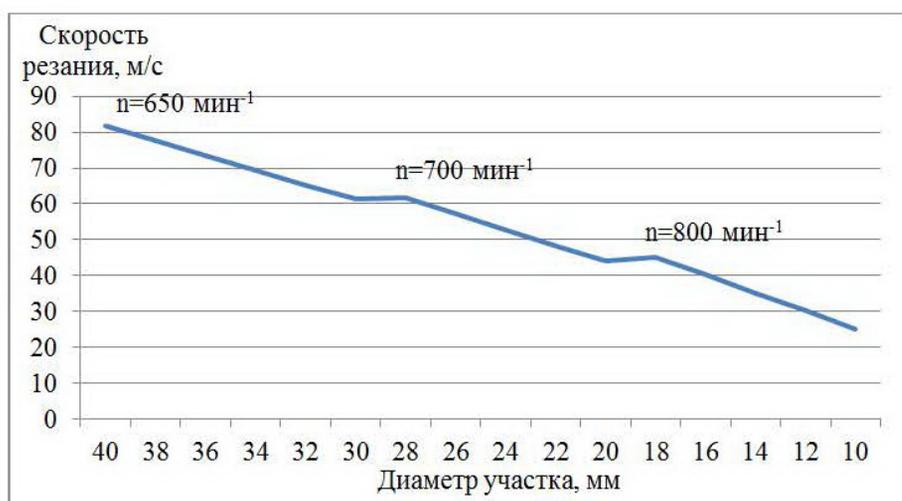


Рисунок 4 – Зависимость изменения линейной скорости резания от диаметра обрабатываемой поверхности детали

представленное на графике (рисунок 4). Это изменение скорости резания обусловлено, в первую очередь, большим перепадом размеров диаметра детали с 40 до 10 мм и изменением мощности резания.

Измерение температуры обрабатываемой конической поверхности детали показало (рисунок 5 а), что при черновой обработке без применения СОЖ максимальная температура достигает значения 185 °С, при обработке с применением СОЖ максимальная температура составляет 125 °С. Скачкообразное изменение значения температуры на графике обуславливается характером обработки: при резании значения температуры возрастают до максимальных значений, а при установочном движении инструмента температура поверхности детали уменьшается, так как отсутствует контакт резца с деталью.

Обработка результатов измерения температуры для условно разбитых участков обрабатываемой поверхности детали, соответствующих различным размерам диаметров детали от мак-

симального (40 мм) до минимального (10 мм), показывает (рисунок 5 б), что значения температуры растут до примерно 12-13 участков, а затем падают. Это объясняется изменением значений линейной скорости вращения детали ( $S_m = 293, 390, 400, 480 \text{ мм/мин}$ ), времени обработки на участках ( $\tau = 1...19 \text{ с}$ ) и тепловыделением в зоне резания (см. рисунок 3). Причем применение СОЖ существенно снижает значения температуры (от 45 до 65 %).

При чистовой обработке конической поверхности без применения СОЖ наблюдается нарастание температуры до значений 160–170 °С (рисунок 6). На последних обрабатываемых участках температура падает за счет сокращения времени обработки. Применение СОЖ снижает максимальные значения температуры до 100 °С. При чистовой обработке с предварительным остыванием заготовки максимальная температура составляет 90 °С. Скачкообразное изменение значений температуры при чистовой обработке и постоянном контакте инструмента с

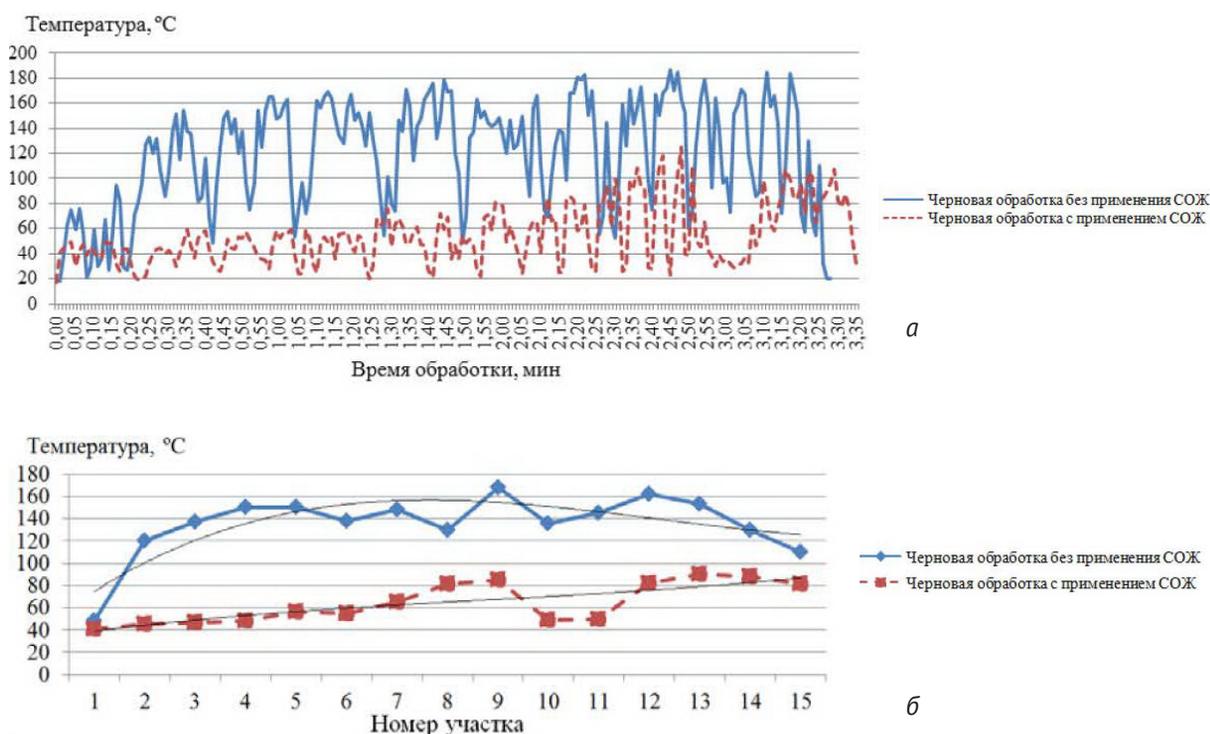


Рисунок 5 – Зависимости температуры от времени обработки (а) и на различных участках обрабатываемой конической поверхности детали (б)

деталью связано с явлением наростообразования.

При обработке сферической поверхности детали «Палец шаровой» по дуге при глубине резания 0,8 мм без применения СОЖ установлено (рисунок 7), что максимальная температура поверхности при частоте вращения заготовки  $n = 800 \text{ мин}^{-1}$  достигает значения  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , при частоте вращения заготовки  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  состав-

ляет  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при частоте вращения заготовки  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  равна  $145 \text{ }^\circ\text{C}$ . Скачкообразное изменение значений температуры обуславливается характером обработки, а именно, при установочном движении температура поверхности падает, так как отсутствует контакт резца с деталью, а при резании наблюдается рост температуры за счет увеличения тепловыделения.

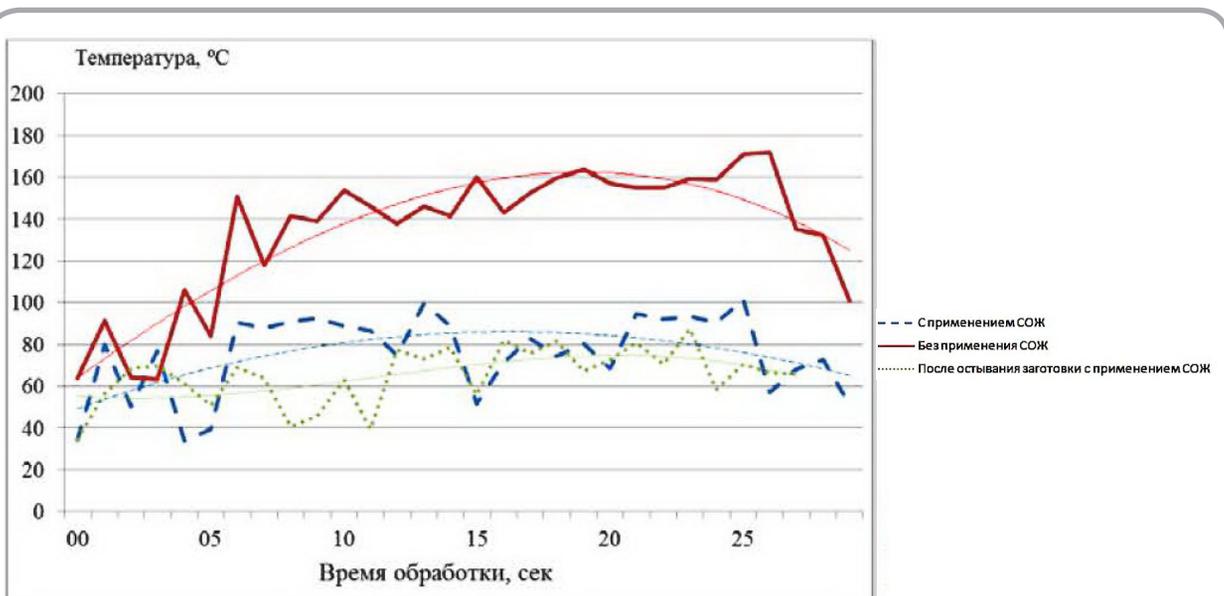


Рисунок 6 – Зависимости температуры от времени при чистовой обработке конической поверхности детали

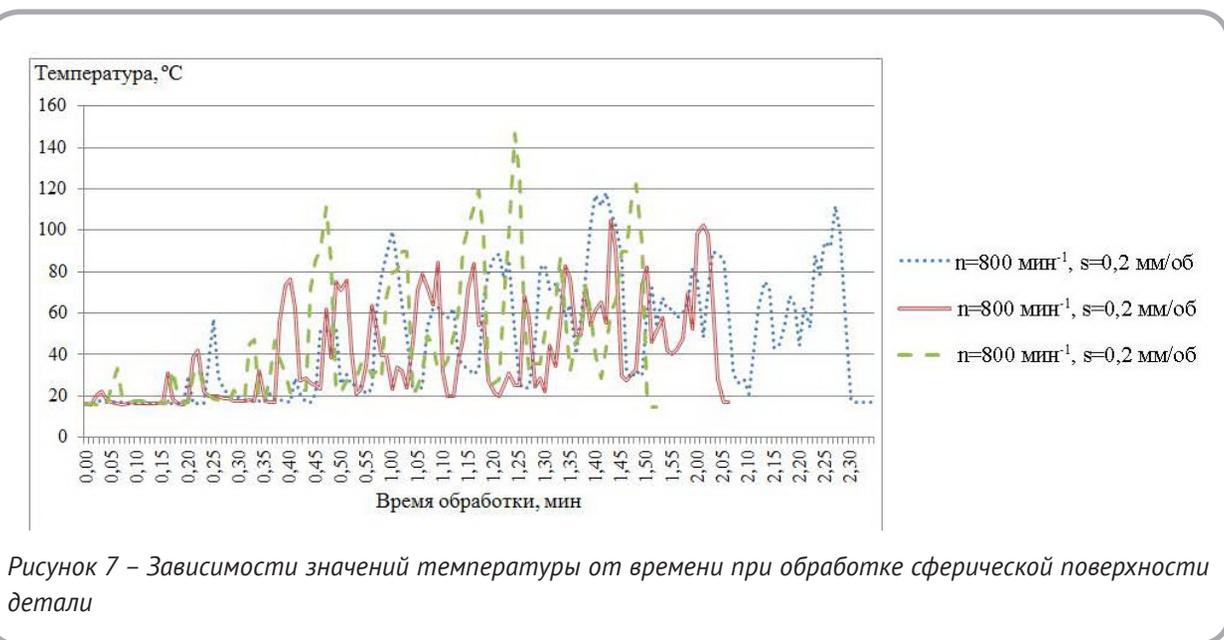


Рисунок 7 – Зависимости значений температуры от времени при обработке сферической поверхности детали

Чистовая обработка сферической поверхности характеризуется нарастанием температуры поверхности детали при частоте вращения заготовки  $n = 800 \text{ мин}^{-1}$  до значения  $112 \text{ }^\circ\text{C}$  (рисунок 8), при частоте вращения заготовки  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  максимальная температура достигает значения  $103 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при частоте вращения заготовки  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  – составляет  $122 \text{ }^\circ\text{C}$ . Скачкообразное изменение значений температуры при чистовой обработке связано с явлением наростообразования.

При обработке сферической поверхности с частотой вращения заготовки  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$

максимальная температура была зафиксирована на завершающем этапе обработки поверхности, что обусловлено накоплением теплоты в процессе резания и опережающим ее распространением в заготовке. Этот вывод иллюстрируют данные, представленные на рисунке 9 – максимальные значения температуры соответствуют меньшим значениям линейной скорости резания.

При обработке сферической поверхности детали в связи с изменением направления вектора скорости подачи в различных точках (секущих плоскостях) сферы будут изменяться значения

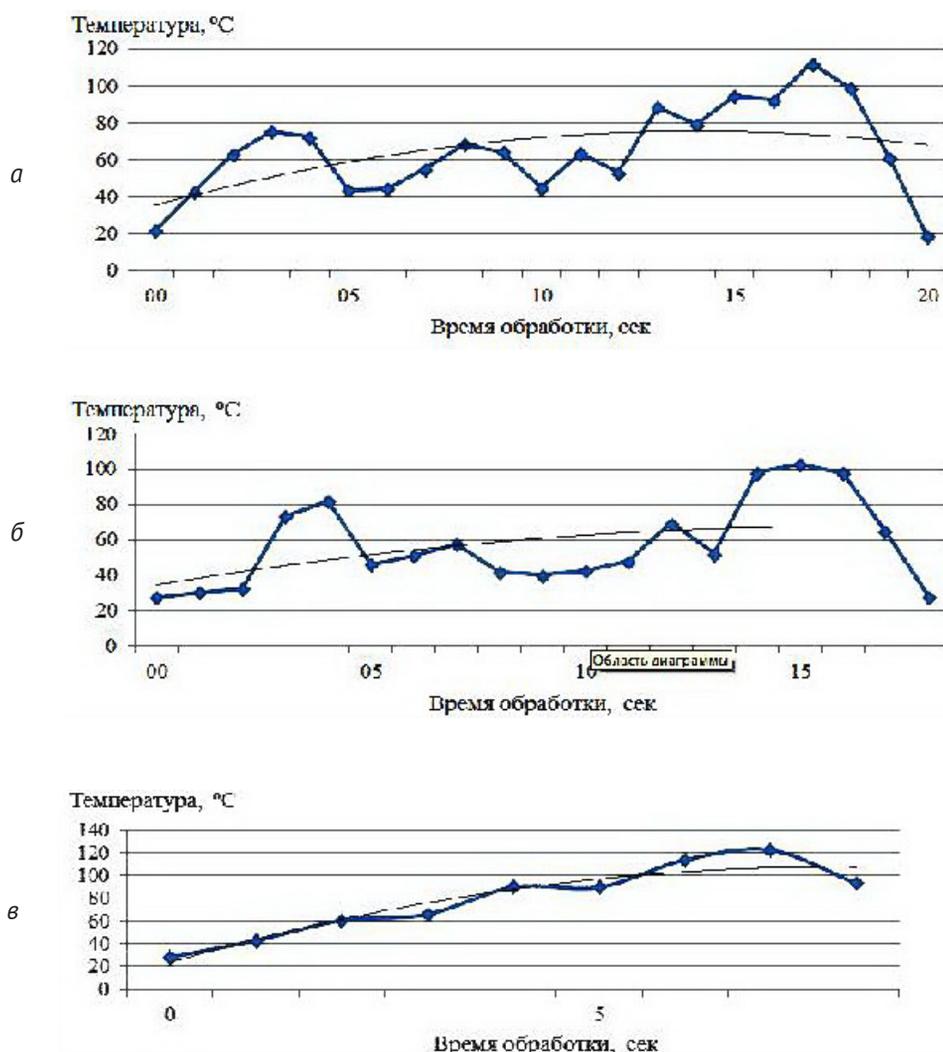


Рисунок 8 – Зависимости значений температуры от времени при чистовой обработке сферической поверхности с частотой вращения детали:  $800 \text{ мин}^{-1}$  (а),  $1000 \text{ мин}^{-1}$  (б) и  $1200 \text{ мин}^{-1}$  (в)

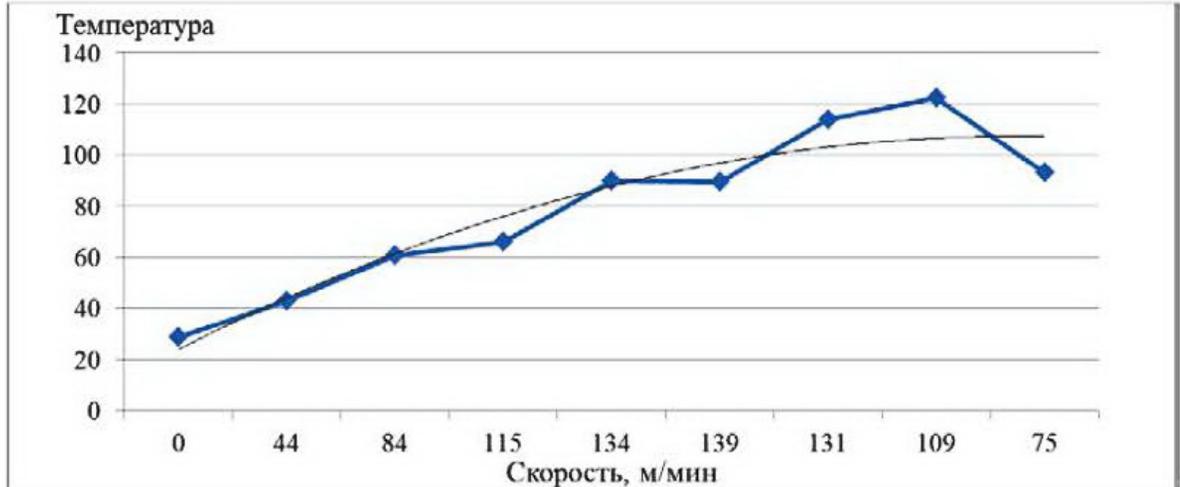


Рисунок 9 – Зависимость значений температуры от линейной скорости резания при чистовой обработке сферической поверхности с частотой вращения заготовки  $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$  и подаче инструмента  $s = 0,2 \text{ мм/об}$

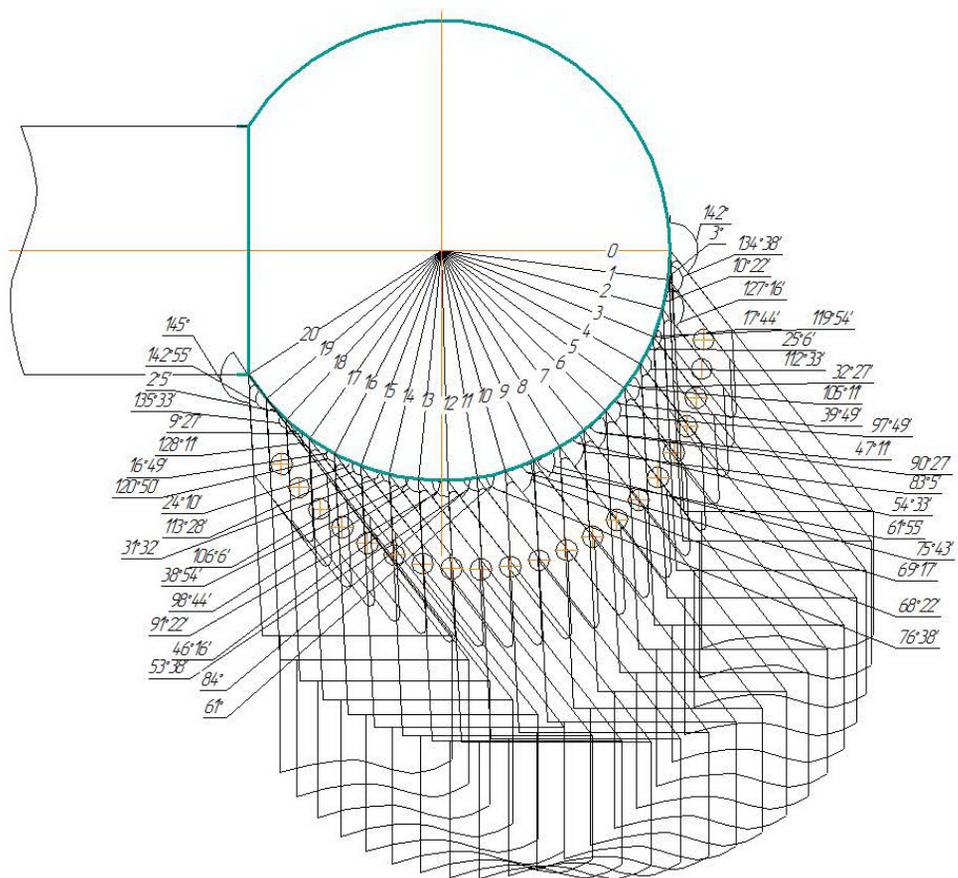


Рисунок 10 – Схема изменения главного и вспомогательного углов в плане реза

главного  $\phi$  и вспомогательного  $\phi_1$  углов в плане резца (рисунок 10) соответственно с  $142$  и  $3^\circ$  до  $0$  и  $145^\circ$ . Надо также учитывать так называемые «перебеги» резца при его входе в заготовку и выходе из нее, которые изменяют размеры сечения срезаемого слоя. Эти изменения оказывают существенное влияние на направление схода стружки, явление наростообразования, отведение теплоты из зоны резания, шероховатость обработанной поверхности детали.

При обработке сферической поверхности детали «Палец шаровой» без применения СОЖ по дуге при  $t = 0,2$  мм было установлено (рисунок 11), что максимальная температура поверхности при частоте вращения заготовки  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> составляет  $125$  °С. Скачкообразное изменение полученных значений температуры обуславливается характером обработки, а именно при установочном движении инструмента температура поверхности падает, так как отсутствует резание.

Чистовая обработка сферической поверхности на последнем рабочем ходе характеризовалась (рисунок 12) нарастанием температуры поверхности при частоте вращения заготовки  $n = 1200$  мин<sup>-1</sup> до значения  $65$  °С. Скачкообразное изменение значений температуры при чистовой обработке связано с явлением нар-

стообразования.

Падение значений температуры нагрева детали на рисунках 5, 6, 8, 9, 12 на завершающих этапах обработки объясняется изменением углов лезвия инструментов и размеров сечения срезаемого слоя (см. рисунок 10).

При обработке деталей различных конфигураций, например, как в нашем случае конуса и сферы, можно ввести понятие коэффициента приведенной интенсивности изменения температуры [3, 4], который оценивается как отношение изменения температуры к единице объёма или площади снимаемого слоя, или длине пути инструмента и единице времени, то есть соответственно:

$$I'_\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{V \cdot \tau}, \frac{\text{град}}{\text{мм}^3 \cdot \text{с}};$$

$$I''_\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{F \cdot \tau}, \frac{\text{град}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}};$$

$$I'''_\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{l \cdot \tau}, \frac{\text{град}}{\text{мм} \cdot \text{с}};$$

где  $V$  – объём снимаемого слоя, мм<sup>3</sup>;  $F$  – площадь снимаемого слоя, мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина пути инструмента, мм.

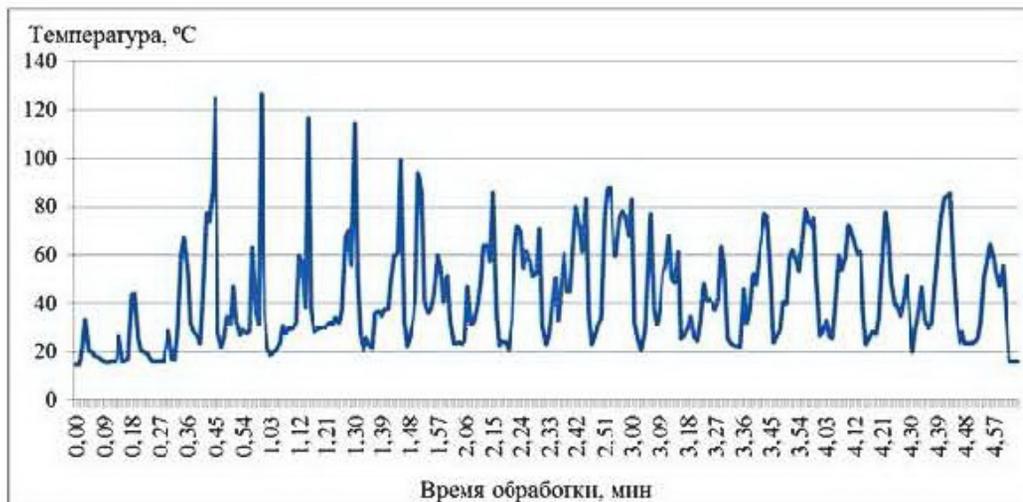


Рисунок 11 – Зависимость значений температуры от времени при черновой и чистовой обработке сферической поверхности детали

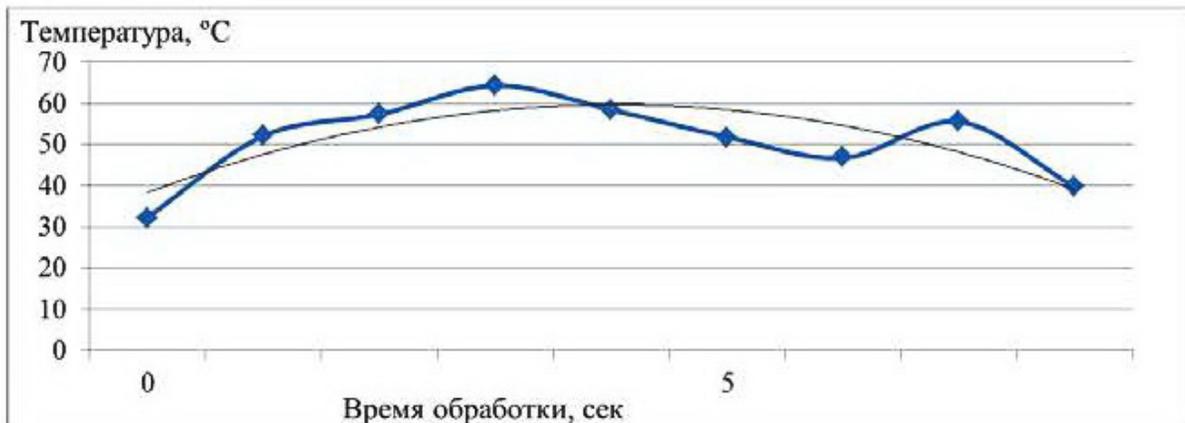
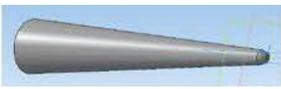


Рисунок 12 – Зависимость значений температуры от времени при чистовой обработке сферической поверхности детали

Таблица 1 – Коэффициенты приведенной интенсивности изменения температуры при обработке конической поверхности детали

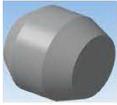
Эскизы заготовок и детали		
Заготовка	Заготовка после черновой обработки	Деталь
		
Расчетные параметры: Масса, г / Объем, см <sup>3</sup>		
1326,632 / 169,646	640,026 / 81,8448	579,844 / 74,1488
Условия обработки	Значения характеристик обработки	Приведенный коэффициент $I_p, °C/мин \cdot см^3$
Черновая + чистовая + СОЖ	$\theta_{max}, °C$	128
	$\theta_{min}, °C$	30
	$\tau, с$	220
Черновая + СОЖ	$\theta_{max}, °C$	124,6
	$\theta_{min}, °C$	20
	$\tau, с$	210
Черновая без СОЖ	$\theta_{max}, °C$	187,1
	$\theta_{min}, °C$	30
	$\tau, с$	210
Чистовая без СОЖ	$\theta_{max}, °C$	172
	$\theta_{min}, °C$	40,3
	$\tau, с$	30
Чистовая + СОЖ	$\theta_{max}, °C$	123,8
	$\theta_{min}, °C$	33,6
	$\tau, с$	30
Чистовая + СОЖ + предварительное остывание	$\theta_{max}, °C$	98,1
	$\theta_{min}, °C$	21,3
	$\tau, с$	30

В этом случае можно сравнивать обработку различных конфигураций деталей и с различным припуском с точки зрения интенсивности нагрева детали, инструмента и стружки.

В таблицах 1 и 2 приведены данные расче-

тов приведенных коэффициентов интенсивности изменения температуры при обработке конической и сферической поверхностей деталей. Анализ данных при обработке конической поверхности детали показывает (рисунок 13),

Таблица 2 – Приведенные коэффициенты интенсивности изменения температуры при обработке сферической поверхности детали

Эскизы заготовок и детали			
Заготовка 	Заготовка с припуском под чистовую 0,8 мм 	Заготовка с припуском под чистовую 0,2 мм 	Деталь 
<b>Расчетные параметры: Масса, г / Объем, см<sup>3</sup></b>			
309,228 / 39,5432	236,564 / 30,2511	217,151 / 27,7687	210,903 / 26,9697
Условия обработки	Значения характеристик обработки		Приведенный коэффициент $I_p, \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин} \cdot \text{см}^3$
<b>Режим резания: <math>S = 0,2 \text{ мм/об}; t = 0,8 \text{ мм}</math></b>			
Черновая + чистовая при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	118,5	3,07
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	22	
	$\tau, \text{ с}$	150	
Черновая + чистовая при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	104,8	3,16
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	22	
	$\tau, \text{ с}$	125	
Черновая + чистовая при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	146,9	5,42
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	22	
	$\tau, \text{ с}$	110	
Чистовая при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	112,1	78,45
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	22	
	$\tau, \text{ с}$	21	
Чистовая при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	102,8	85,33
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	32,8	
	$\tau, \text{ с}$	15	
Чистовая при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	122,3	190,37
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	28,6	
	$\tau, \text{ с}$	9	
<b>Режим резания: <math>S = 0,2 \text{ мм/об}; t = 0,2 \text{ мм}</math></b>			
Черновая + чистовая при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	126	26,53
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	20	
	$\tau, \text{ с}$	300	
Чистовая при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$	$\theta_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	64,3	267,01
	$\theta_{min}, \text{ }^\circ\text{C}$	32,3	
	$\tau, \text{ с}$	9	

что применение СОЖ снижает приведенную интенсивность тепловыделения как при черновой (с 0,51 до 0,28), так и при чистовой (с 34,23 до 19,96) обработке. Снижению интенсивности также способствует остывание заготовки перед окончательной чистовой обработкой.

При обработке сферических поверхностей с увеличением частоты вращения детали приведенная интенсивность изменения температуры возрастает (рисунок 14). Причем при чистовых проходах резца приведенная интенсивность температуры выше, чем при черновых (рисунок 14 б, в) в связи с уменьшением объема снимаемого слоя и времени обработки.

Сравнение приведенной интенсивности изменения температуры при обработке конической и сферической поверхностей показывает (см. рисунки 13 и 14), что ее значения гораздо выше при обработке сферы. Это объясняется меньшими значениями объема снимаемого слоя и времени обработки, а также большими значениями частоты вращения сферической поверхности в сопоставлении с обработкой конической поверхности.

При установленных значениях температуры нагрева как конической, так и сферической поверхностей деталей в пределах 90–170 °С, рост приведенной интенсивности изменения температуры не оказывает существенного влияния на структуру и фазовый состав материала детали. Однако в случае высокоскоростной обработки

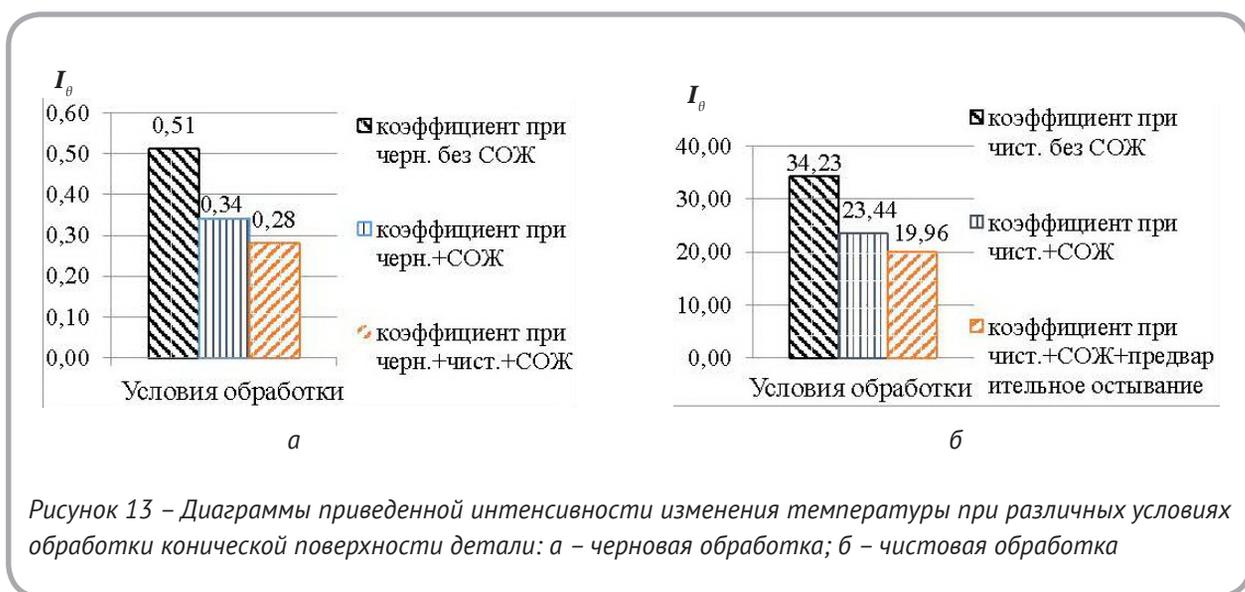
поверхности детали необходимо снижать приведенную интенсивность изменения температуры путем применения СОЖ и теплоотвода в стружку.

Данные измерений шероховатости обработанной поверхности детали при различных базовых длинах измерений имеют значения, которые находятся в пределах  $Ra$  3,45–5,8 мкм. Такая шероховатость соответствует общепринятым значениям при токарной чистовой обработке поверхностей. Причем для сферических поверхностей отмечается увеличение шероховатости поверхности вблизи оси вращения детали, что связано с уменьшением значений ее линейной скорости.

#### Выводы

1. Установлены рациональные схемы обработки, заключающиеся в последовательном съеме припуска вдоль оси при обработке длинных конических и по дуге при обработке сферических поверхностей деталей, и диапазоны режима резания ( $n = 800–1200 \text{ мин}^{-1}$ ;  $S = 0,2–0,5 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,2–1,0 \text{ мм}$ ), обеспечивающие уменьшение упругих отжатый заготовки и резца, исключение вибрации, что позволило сократить машинное время обработки длинных конических и сферических поверхностей на 10–15 %.

2. Определены условия обработки ( $n = 800–1200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $S = 0,2 \text{ мм/об}$ , геометрия инструмента – пластина с углом при вершине  $\epsilon = 35^\circ$ , применение СОЖ), при которых обеспе-



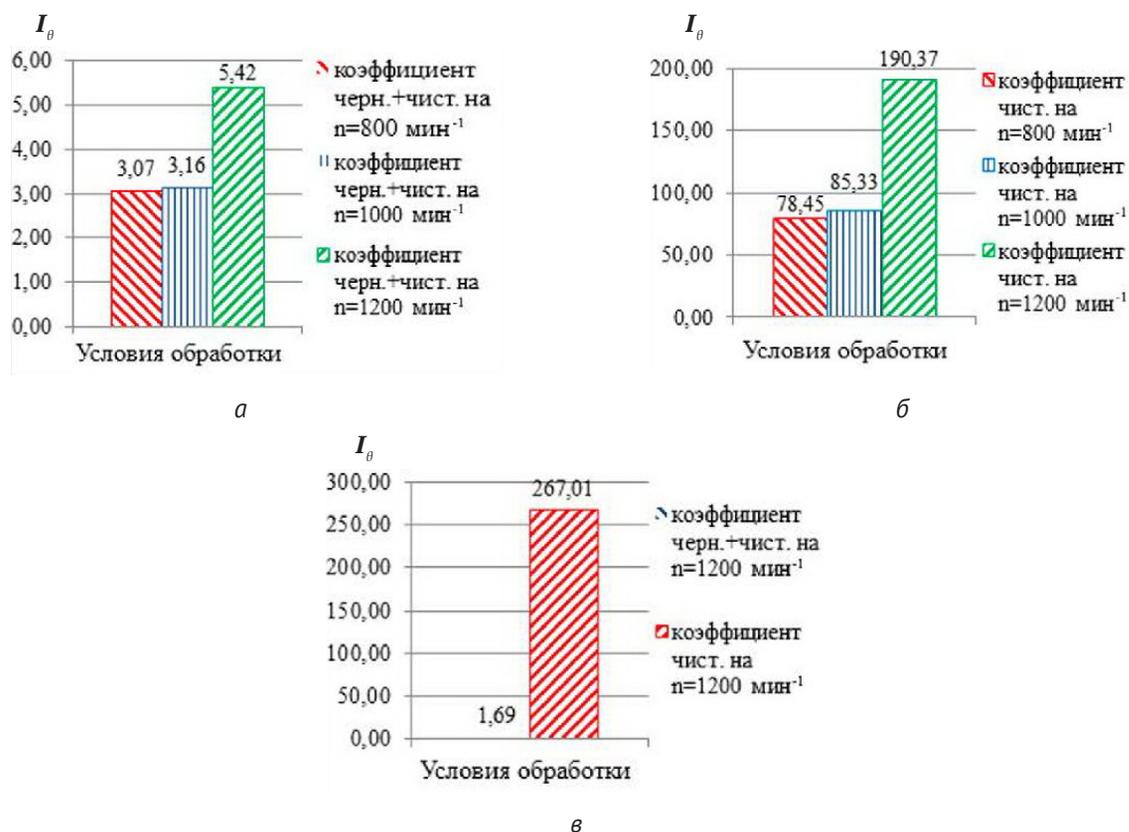


Рисунок 14 – Диаграммы приведенной интенсивности изменения температуры при различных условиях обработки сферической поверхности детали: а – черновая обработка при  $t = 0,8 \text{ мм}$ ; б – чистовая обработка при  $t = 0,8 \text{ мм}$ ; в – черновая и чистовая обработка при  $t = 0,2 \text{ мм}$

чивается минимальное тепловыделение в зоне резания и нагрев детали до  $90-170 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Установлен эффект опережающего распространения теплоты в сферических поверхностях по отношению к изменению линейной скорости вращения детали, что позволяет управлять процессом резания и оптимизировать режимы обработки.

4. Предложено сравнивать обработку деталей различной конфигурации и с различным при-

пуском по приведенной интенсивности изменения температуры, что позволяет снижать нагрев детали путем управления тепловыделением за счет изменения режимов резания, применения СОЖ и так далее. Расчет коэффициента приведенной интенсивности изменения температуры также позволяет увеличивать производительность обработки без критического (предельного) нагрева поверхностей деталей, приводящих к изменению их структуры и фазового состава.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов, В.А. (1995), *Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием*, Минск, Наука и техника, 264 с.
2. Жолобов, А.А. (2009), *Программирование процессов обработки поверхностей на станках с ЧПУ*, Могилев, Беларусско-российский университет, 338 с.
3. Резников, А.Н., Резников, Л.А., (1990), *Тепловые процессы в технологических системах*, Москва, Машиностроение, 288 с.
4. Попок, Н.Н., Хмельницкий, Р.С., Анисимов, В.С., Сидикевич, А.В. (2017), Интенсивность тепловыделения при обработке конических и сферических поверхностей деталей на станках с ЧПУ, Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки, *Тезисы докладов международной научно-технической конференции*, Минск, Бизнессофсет, 2017, С. 181-183.

## REFERENCES

1. Danilov, V.A. (1995), *Form-forming treatment of complex surfaces by cutting* [Formoobrazujushaja obrabotka slozhnyh poverhnostej rezaniem], Minsk, Nauka i tehnika, 264 p.
2. Zholobov, A.A. (2009), *Programming of surface treatment processes on CNC machines* [Programmirovanie processov obrabotki poverhnostej na stankah s ChPU], Mogilev, Belarusian-Russian university, 338 p.
3. Reznikov, A.N., Reznikov, L.A. (1990), *Thermal processes in technological systems* [Teplovyje processy v tehnologicheskikh sistemah], Moscow, Mashinostroenie, 288 p.
4. Popok, N.N., Khmelnitsky, R.S., Anisimov, V.S., Sidikevich, A.V. (2017), Intensity of heat release during processing of conical and spherical surfaces of parts on CNC machines [Intensivnost' teplovydelenija pri obrabotke konicheskikh i sfericheskikh poverhnostej detalej na stankah s ChPU], Perspective directions of development of technology of machine building and metalworking, *Abstracts of the International scientific and technical conference*, Minsk, Biznessofset, pp. 181-183.

*Статья поступила в редакцию 15. 03. 2017 г.*