

УДК 621.91.01/02:793(075.8)

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-35-44

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ И ОХЛАЖДАЮЩИМИ ПОТОКАМИ ПРИ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕПОЛНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

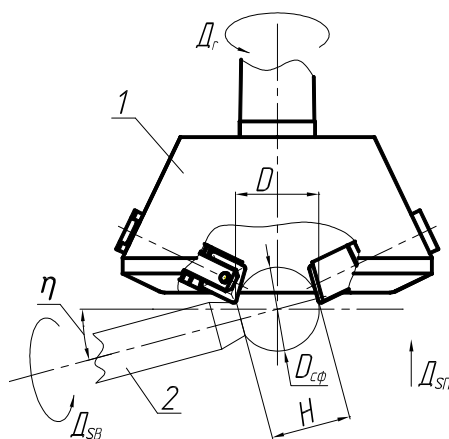
*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК,
канд. техн. наук Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, канд. техн. наук С.А. ПОРТЯНКО
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Рассмотрена комбинированная скоростная обработка неполных сферических поверхностей деталей. Выведены формулы для расчета температуры резания с учетом угла контакта инструмента с заготовкой. Приведены результаты экспериментальных исследований температур детали и стружки в зависимости от времени обработки, а также моделирования охлаждающих воздушных потоков в инструменте и зоне резания.

Ключевые слова: температура, тепловой поток, неполная сферическая поверхность, скоростная обработка, многолезвийный режущий инструмент.

Введение. При механической обработке поверхностей деталей в зонах упругого и пластического деформирования срезаемого слоя и трения контактных площадок лезвия инструмента со стружкой выделяется большое количество теплоты. Тепловые потоки направлены в стружку, деталь, инструмент и окружающую среду, и их распределение по величине зависит от режимов резания, свойств обрабатываемого и инструментального материалов, охлаждения и других условий. Регулирование тепловых потоков по направлению и величине при резании имеет большое значение, т.к. позволяет нагрев детали и повысить ее качество и точность. Особенно актуально решение этой задачи для скоростной лезвийной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей, осуществляемой при значениях скорости резания выше принятых традиционно¹. Предлагается комбинированная скоростная обработка неполных сферических поверхностей деталей, для которых необходимы исследования выделяемой в зоне резания теплоты, температуры детали и стружки, что позволит предложить эффективный способ охлаждения и снижения нагрева детали.

Основная часть. Схема комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей детали представлена на рисунке 1 [1].



**Рисунок 1. – Схема комбинированной скоростной обработки
неполной сферической поверхности детали**

Согласно схеме режущий инструмент 1 совершает главное вращательное движение D_r , а заготовка 2 диаметром $D_{сф}$ – вращательное движение подачи $D_{св}$. Заготовке также сообщается поступательное движение $D_{сп}$, которое обеспечивает врезание на заданную глубину резания. При этом режущие лезвия инструмента 1 настраиваются на диаметр D , а заготовка 2 устанавливается относительно инструмента под углом η к оси вращения. Оси вращения заготовки и инструмента пересекаются. Схема установки гарантирует получение неполной сферической поверхности высотой H . Высокое качество обработанной поверхности обеспечивается последовательной реализацией процессов врезания и выхаживания. Кинематическая схема при врезании вращающегося инстру-

¹ Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. – URL: <http://insoftmach.ru/HSC.html>

мента во вращающуюся заготовку – трехэлементная ($D_r, D_{sv}, D_{сп}$), а при выхаживании, когда поступательное движение $D_{сп}$ отключается, переходит в двухэлементную (D_r, D_{sv}). Сложная траектория резания реализуется в виде циклоиды, накрутой на окружность сферы по спирали.

Режимы резания при обработке поверхности детали из конструкционной углеродистой стали: частота вращения инструмента – 3000–12 000 мин⁻¹, частота вращения детали – 10–200 мин⁻¹;

Для теоретических исследований тепловых явлений использовались известные математические формулы [2] для расчета температуры в цилиндрических и сферических телах, т.к. заготовка в рассматриваемом случае имеет форму цилиндра, а готовая деталь – форму сферы.

Для цилиндра:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + \varphi \frac{\partial \Theta}{\partial \mu}. \quad (1)$$

Для сферы:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где Θ – температура;

t – время;

k – коэффициент теплопроводности;

r, μ, z, φ – координаты.

Примем, что источник теплоты является быстродвижущимся, поскольку скорость вращения фрезы достигает 10 м/с и критерий Пекле $Pe > 10$:

$$Pe = 10 \frac{v \cdot l_n}{k}, \quad (3)$$

где v – скорость резания;

l_n – размер контактной площадки.

Исходная схематизация источника теплоты предложена в работе [3] и с учетом особенностей комбинированной обработки представлена на рисунке 2.

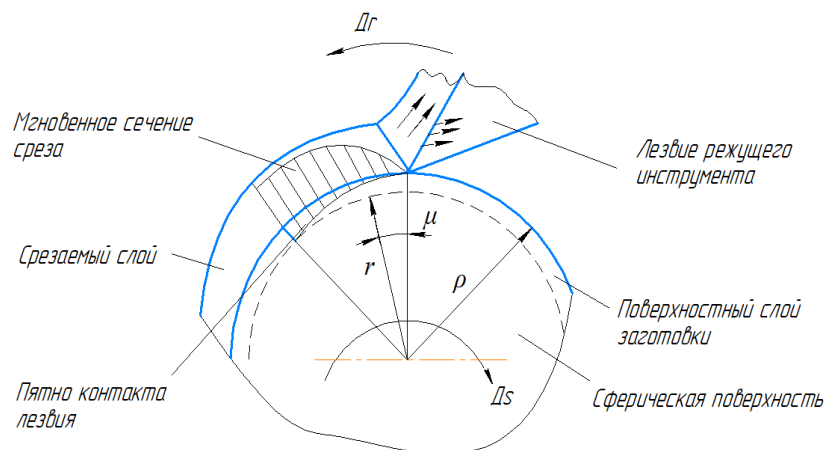


Рисунок 2. – Схема источника теплоты при комбинированной обработке сферической поверхности

Через площадки контакта в форме «запятая» тепловые потоки из зоны резания направляются в заготовку, стружку и лезвие инструмента. Длина контакта определяется по эмпирической формуле

$$l_n = l \cdot \sin^{\alpha l} \mu, \quad (4)$$

где μ – угол контакта;

l – коэффициент, представляющий среднее значение длины контакта при $\mu = 90^\circ$,

$$l = \frac{c_l \cdot S^{y_l}}{\left(\frac{v_\phi}{v_d} \right)^{z_l}},$$

где S – подача;

- v_{ϕ} – линейная скорость фрезы;
- v_d – линейная скорость детали;
- c_l – поправочный коэффициент;
- y_l, z_l – показатели степеней.

Температура от точечного источника теплоты, согласно [4], описывается следующим уравнением:

$$\Theta_{p,s,2}(r, \mu, \tau) = \frac{q_{p,s,2} \exp\left[-\frac{z^2}{4k(\tau - \tau_s)}\right]}{\pi \cdot R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot k \cdot (\tau - \tau_s)}} \cdot \left[1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos n(\mu - \mu_s) \cdot \sum_a \frac{\exp[-k \cdot a^2 \cdot (\tau - \tau_s)] \cdot a^2 \cdot \ln(ar) \cdot \ln(ar_s)}{\left(a^2 - \frac{n^2}{R^2}\right) \cdot \ln^2(aR)} \right], \quad (5)$$

где r, μ – координаты точки в цилиндрической системе координат;

r_s, μ_s – координаты источника теплоты;

τ – текущее время;

τ_s – время действия источника теплоты;

$q_{p,s,2}$ – интенсивность точечного источника теплоты;

k – коэффициент температуропроводности тела;

λ – коэффициент теплопроводности тела;

$\ln(x)$ – функция Бесселя n -го порядка первого рода от действительного аргумента;

\sum_a – суммы положительных корней характеристического уравнения $a^2 \cdot \ln(aR) = 0$;

n – порядок суммирования ($n = 0, 1, 2 \dots$).

Начальные условия

$$0 \leq \mu \leq 2\pi; 0 \leq r \leq R, \tau > 0; \tau|_{\tau=0} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r} \Big|_{R=0} = 0. \quad (7)$$

Формула для расчета температуры в заготовке при воздействии источника температуры в форме «запятая» имеет следующий вид:

$$\Theta_{s,2} = \frac{q_{s,2} \exp\left[-\frac{z^2}{4k(\tau - \tau_s)}\right]}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\tau - \tau_s}} \cdot \left[l \cdot \sin^{xl} \mu \left(R - \frac{1}{2} \cdot \sin^{xl} \mu \right) + 2 \sum_a \frac{\exp[-k \cdot a^2 (\tau - \tau_s)] \cdot I_0(a \cdot R)}{I_0(a \cdot R)} \cdot \int_{R-l \cdot \sin^{xl} \mu}^R r_s \cdot l_0(a \cdot r) \cdot dr_s \right]. \quad (8)$$

Если источник действует в течение времени от 0 до τ_s , то формула (8) приводится к виду

$$\Theta_{s,2}(r, z, \tau) = \frac{2q_{s,2}}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{n \cdot k_s}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{xl} \mu \cdot (2R - l \cdot \sin^{xl} \mu) \cdot \left[2\sqrt{\tau} \cdot \exp\left(\frac{z^2}{4k\tau}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{k \cdot \tau}}\right) \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \sum_a \frac{\exp(-a^2 \cdot r) \cdot I_0(a \cdot r)}{a \cdot I_0^2(a \cdot R)} \cdot \int_{R-l \cdot \sin^{xl} \mu}^R r_s \cdot l_0(a \cdot r_s) \cdot \int_0^{a\sqrt{k_s}} \exp\left[-\left(\frac{za}{2x} - x\right)^2\right] dx \right\}. \quad (9)$$

При длительном воздействии источника ($\tau \rightarrow \infty$) формула (8) примет вид:

$$\Theta_{s,2}(r, \mu, \tau) = \frac{2q_{s,2}}{R^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{n \cdot k}} \cdot \left\{ l \cdot \sin^{xl} \mu \cdot (2R - l \cdot \sin^{xl} \mu) \cdot \left[2\sqrt{\tau} \cdot \exp\left(\frac{z^2}{4k\tau}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \cdot \sum_a \frac{e^{-a^2 \cdot r} \cdot I_0(a \cdot r)}{a \cdot I_0^2(a \cdot R)} \cdot \left\{ \frac{R}{a} I_1(aR) - \frac{R - l \sin^{xl} \mu}{a} \cdot I_1[a \cdot R - l \sin^{xl} \mu] \right\} \right\}. \quad (10)$$

По формуле (10) были рассчитаны значения температуры резания θ при различных углах контакта инструмента с заготовкой μ . Фрагмент результатов расчета приведен на рисунке 3 в виде графика. Согласно графику с ростом угла контакта с 10° до 20° температура в зоне резания возрастает от 450°C до 750°C , что объясняется ростом нагрузки и мощности резания.

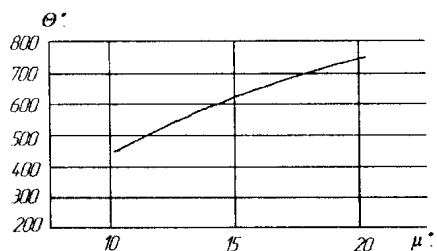


Рисунок 3. – Зависимость температуры резания θ от угла контакта μ

Для проверки результатов расчета и определения нагрева стружки и детали были проведены экспериментальные исследования.

При определении температуры стружки методом калориметрирования установлено, что на этапе врезания при обработке острозаточенным инструментом с частотой вращения $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$ и частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$ ее значения находятся в пределах 410–460 °С [5]. При превышении допустимых значений износа лезвий (выше 0,4 мм) температура начинает резко увеличиваться. При частоте вращения инструмента 12 000 мин^{-1} температура резко повышается вплоть до температуры плавления обрабатываемого материала, и стружка формируется в виде капель (рисунок 4).

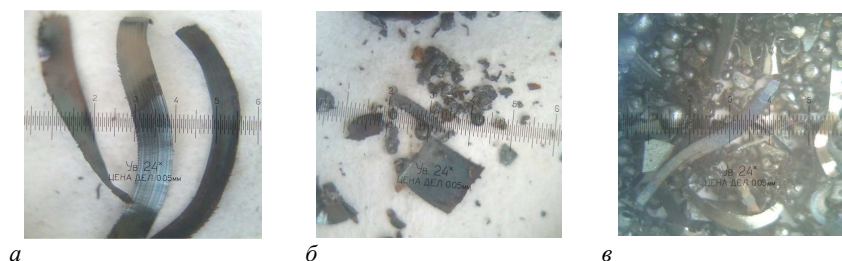
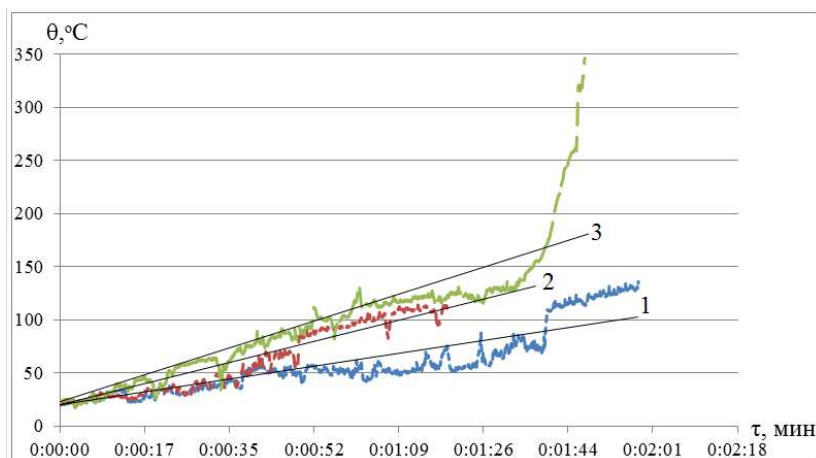


Рисунок 4. – Формы стружки на этапе врезания (а), выхаживания (б), при работе затупленным инструментом с $n_1 = 12\,000 \text{ мин}^{-1}$ (в)

При помощи пирометра «Optris LS» определялось влияние режимов резания на температуру обработанной неполной сферической поверхности детали. В результате экспериментов установлено, что в зависимости от частот вращения инструмента и заготовки и их диаметров температура поверхности изменяется от 30 до 120 °С. Изменение температуры поверхности детали при последовательной обработке трех заготовок диаметром 35 мм одним инструментом с частотой вращения 6300 мин^{-1} и разными поперечными подачами представлено на рисунке 5.



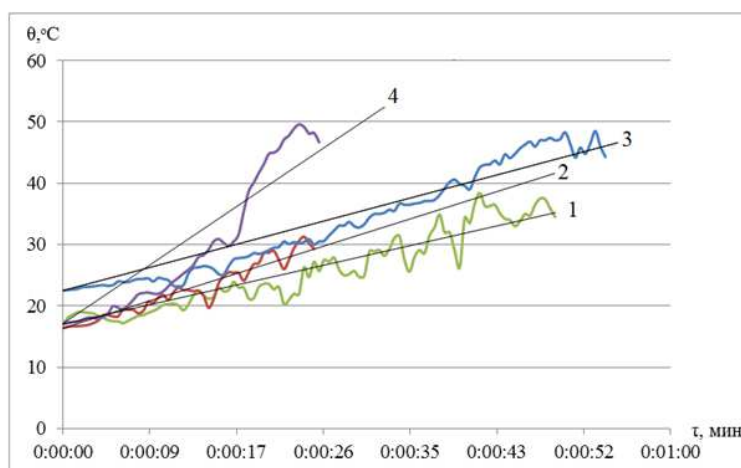
1 – заготовка 1, поперечная подача $S_n = 0,508 \text{ мм/мин}$; 2 – заготовка 2, поперечная подача $S_n = 0,759 \text{ мм/мин}$; 3 – заготовка 3, поперечная подача $S_n = 0,612 \text{ мм/мин}$

Рисунок 5. – Зависимости изменения температуры поверхности детали диаметром 35 мм от времени обработки с частотой вращения инструмента 6300 мин^{-1} и частотой вращения заготовки $n_2 = 20 \text{ мин}^{-1}$

По мере затупления режущих кромок лезвия инструмента интенсивность накопления температуры в поверхности детали возрастает с 0,98 до 1,37 °C/c (см. рисунок 5). Нагрев поверхности детали до 160 °C свидетельствует о том, что по мере увеличения размеров фаски износа на задней поверхности лезвия инструмента тепловые потоки, направленные в инструмент и деталь, увеличиваются. При этом влияние поперечной подачи (глубины резания или ширины сечения срезаемого слоя) как фактора, улучшающего теплоотвод в стружку, снижается. При достижении величины высоты и длины фаски износа более 0,4 и 4 мм соответственно наблюдаются резкое увеличение температуры до 300–400 °C за короткий промежуток времени (10–15 с) и катастрофический износ лезвия инструмента.

Отсюда можно сделать вывод, что чем больше частота вращения и диаметр инструмента, а следовательно, и скорость резания, тем выше значения температуры и интенсивность нагрева поверхности детали. Интенсивность накопления теплоты в поверхности детали зависит от величины поперечной подачи и износа лезвия.

Обработка неполных сферических поверхностей деталей диаметром 35 мм на разных частотах вращения инструмента и поперечных подачах при частоте вращения заготовки 200 мин⁻¹ приводит к росту температуры до 50 °C (рисунок 6). На графиках видно, что при частоте вращения инструмента 12 000 мин⁻¹ интенсивность накопления теплоты в поверхности детали резко возрастает. Эти графики подтверждают возможность регулирования интенсивности тепловыделения за счет изменения частоты вращения инструмента, поперечной подачи и износа лезвия. Так, увеличение частоты вращения инструмента с 3150 мин⁻¹ до 9 000 мин⁻¹ при изменении поперечной подачи с 1,61 мм/мин до 2,25 мм/мин и 0,853 мм/мин, а также увеличение износа лезвия практически не изменяют интенсивность тепловыделения.



1 – $n_1 = 3150$ мин⁻¹ и $S_n = 1,61$ мм/мин; 2 – $n_1 = 6300$ мин⁻¹ и $S_n = 2,25$ мм/мин;
3 – $n_1 = 9000$ мин⁻¹ и $S_n = 0,853$ мм/мин; 4 – $n_1 = 12 000$ мин⁻¹ и $S_n = 1,543$ мм/мин

Рисунок 6. – Зависимости изменения температуры поверхности детали диаметром 35 мм от времени обработки с частотой вращения заготовки $n_2 = 200$ мин⁻¹

Как показали результаты исследований, путем изменения значений частот вращения инструмента и заготовки можно регулировать величину и интенсивность теплопередачи.

Для более эффективного охлаждения зоны резания предлагается модернизация конструкции инструмента, заключающаяся в изготовлении отверстий (каналов) в корпусе, через которые воздух, захватываемый из окружающей среды, подается в закрытую полость корпуса инструмента и зону резания. Данная модернизация позволяет улучшить отвод стружки из зоны резания и, как следствие, снизить нагрев обработанной поверхности детали.

Для моделирования процесса охлаждения рассмотрим корпус режущего инструмента (рисунок 7), в котором выполнены каналы цилиндрической и конической форм диаметром 8–14 мм.

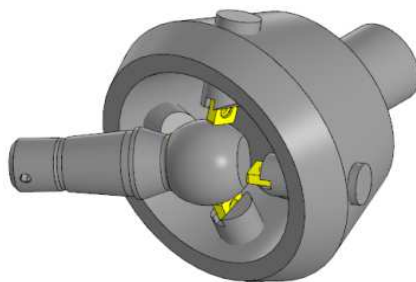


Рисунок 7. – Моделирование обработки неполных сферических поверхностей деталей

Примем поток воздуха несжимаемым. Тогда, используя уравнение Бернулли для несжимаемой среды, рассчитаем объем потока воздуха:

$$Q = A v_n, \quad (11)$$

где $A = \pi r^2$ – площадь сечения канала;
 r – радиус канала;
 v_n – скорость потока воздуха.

Скорость потока воздуха может быть рассчитана с использованием принципа сохранения энергии между точками входа и выхода потока, а также учетом таких факторов, как разница давлений, потери энергии из-за трения и др., специфичных для конкретного способа охлаждения.

Скорость потока воздуха, захватываемого из окружающей среды вращающимся инструментом, рассчитывается по формуле

$$v_n = \frac{2\pi \cdot r n}{t}, \quad (12)$$

где n – частота вращения инструмента.

Зависимости изменения скорости и производительности подачи объема потока от размера радиуса канала представлены на графиках (рисунки 8 и 9).

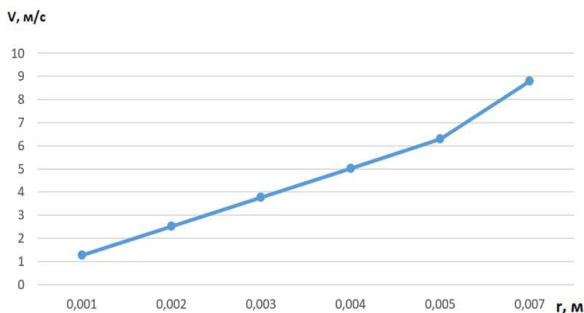


Рисунок 8. – Зависимость скорости потока воздуха от размера радиуса канала

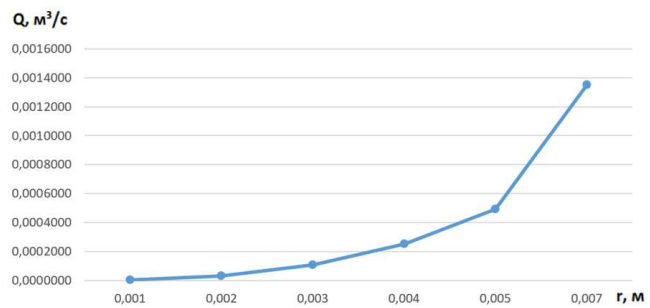


Рисунок 9. – Зависимость производительности подачи объема потока воздуха от размера радиуса канала

Так, при канале диаметром 10 мм производительность подачи объема потока воздуха, захватываемого каналом при вращении инструмента, составляет приблизительно 0,0005 м³/с.

Для расчета потока воздуха в коническом канале воспользуемся уравнением непрерывности, согласно которому производительность подачи объемного потока воздуха должна оставаться постоянной вдоль всего канала:

$$Q_1 = Q_2, \quad (13)$$

где Q_1 и Q_2 – производительность подачи объемного потока воздуха на входе и выходе канала.

Поскольку площадь сечения изменяется вдоль конического канала, то можем выразить производительность подачи объемного потока через площади сечений и скорости потока воздуха:

$$A_1 v_{n1} = A_2 v_{n2}, \quad (14)$$

где A_1 и A_2 – площади сечений на входе и выходе канала;
 v_{n1} и v_{n2} – скорости потока воздуха на входе и выходе канала.

Если известны площадь сечения и скорость потока воздуха на входе канала, то можно найти скорость потока воздуха на выходе канала:

$$v_{n2} = \frac{A_1 v_{n1}}{A_2}. \quad (15)$$

Таким образом, зная площадь сечения и скорость потока воздуха на входе канала, а также соответствующие значения на выходе, можно рассчитать скорость выходящего потока воздуха из конического канала. Графики изменения скорости и производительности подачи объема потока воздуха, проходящего через конический канал с радиусом 4 мм на выходе, от размера радиуса на входе представлены на рисунке 10.

Зависимости изменения скоростей потока воздуха на входе v_{n1} и выходе v_{n2} канала представлены на графике (рисунок 11).

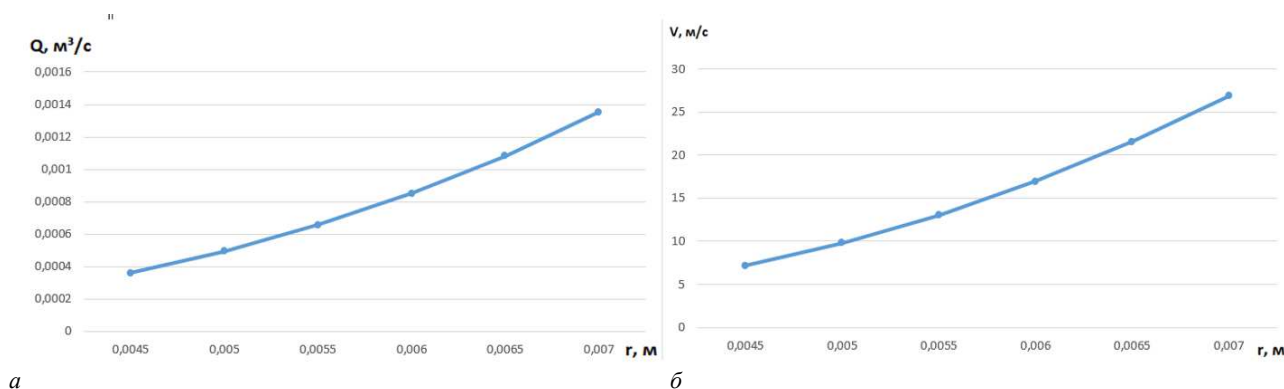


Рисунок 10. – Зависимости производительности подачи объема (а) и скорости (б) потока воздуха от размера радиуса на входе канала

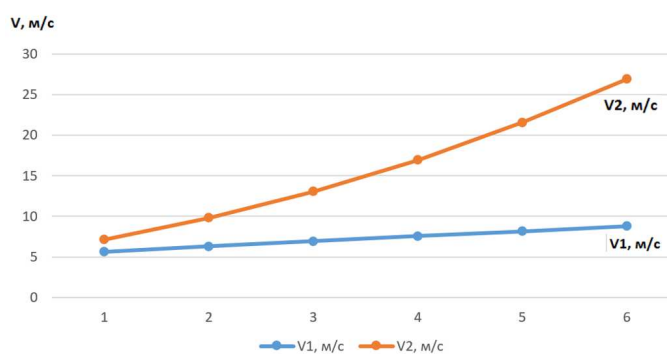


Рисунок 11. – Зависимости скорости потоков на входе и на выходе из канала

Результаты расчетов скорости и производительности объемного потока воздуха через цилиндрические и конические каналы приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов скорости и производительности объемного потока воздуха при обработке комбинированным инструментом через каналы в корпусе инструмента

Параметры канала	Скорость потока воздуха v на выходе из канала, м/с	Производительность объемного потока воздуха Q , м³/с
Цилиндрический канал, диаметр канала 10 мм	6,3	0,0005
Цилиндрический канал, диаметр канала 8 мм	5,1	0,00028
Цилиндрический канал, диаметр канала 6 мм	3,8	0,00012
Конический канал, диаметр на входе 10 мм, на выходе 8 мм	9,916	0,0005
Конический канал, диаметр на входе 12 мм, на выходе 8 мм	16,98	0,000852
Конический канал, диаметр на входе 14 мм, на выходе 8 мм	26,96	0,00135

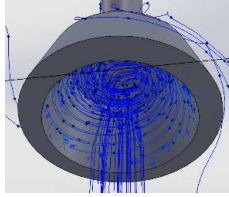
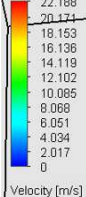
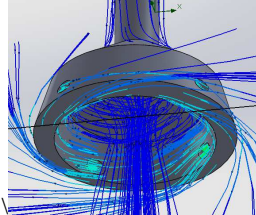
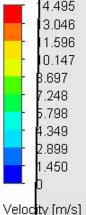
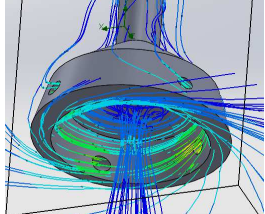
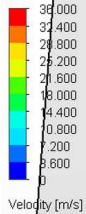
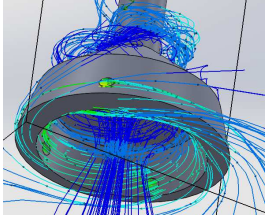
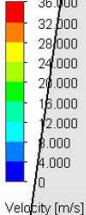
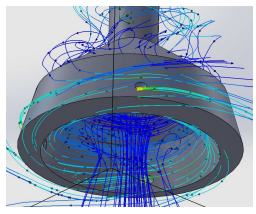
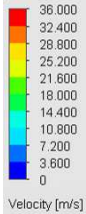
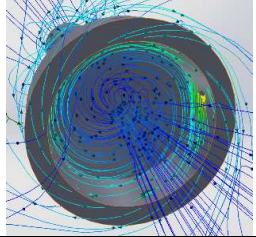

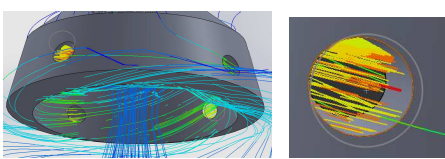
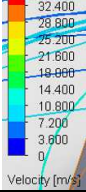
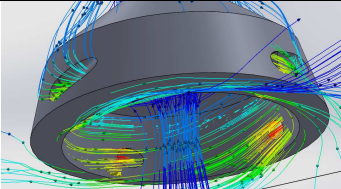
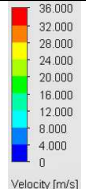
Согласно расчетам скорость потока воздуха будет больше в коническом канале по сравнению с цилиндрическим. Это связано с изменением площади поперечного сечения вдоль оси канала. В коническом канале увеличение площади поперечного сечения на входе приводит к ускорению потока воздуха, т.к. позволяет захватить больший объем из окружающей среды.

Для изучения потоков воздуха при реализации комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей детали было проведено моделирование с использованием программного продукта SOLIDWORKS Flow Simulation. Результаты моделирования скоростей потоков воздуха внутри корпуса инструмента при различных частотах вращения инструмента и геометрических форм и размеров каналов приведены в таблице 2.

Моделирование скоростей потоков воздуха при вращении инструмента с частотой 2000 мин⁻¹ внутри корпуса без каналов показывает, что их значения не превышают 2–4 м/с (поз. 1, таблица 2), а в корпусе с каналами цилиндрической формы диаметром 10 мм получаем на выходе из него скорости потоков не более 6–7 м/с (поз. 2, таблица 2).

Увеличение частоты вращения инструмента до 12 000 мин⁻¹ с каналами цилиндрической формы диаметром 10 мм приводит к увеличению скорости потоков до 25 м/с (поз. 3, таблица 2). Следует отметить, что с уменьшением диаметра цилиндрического канала скорость потоков увеличивалась, но объем потока на выходе из канала был незначительным и разбивался внешними потоками (поз. 4 и 5, таблица 2).

Таблица 2. – Результаты моделирования охлаждающих потоков воздуха

№ п/п	Частота вращения инструмента	Форма и размер диаметра канала	Фрагмент моделирования	
			Модель потоков воздуха	Шкала
1	2000 мин ⁻¹	Без канала		
2	2000 мин ⁻¹	Цилиндрический Ø10 мм		
3	12 000 мин ⁻¹	Цилиндрический Ø10 мм		
4	12 000 мин ⁻¹	Цилиндрический Ø 8 мм		
5	12 000 мин ⁻¹	Цилиндрический Ø 6 мм		
6	12 000 мин ⁻¹	Конический Ø10 мм/Ø8 мм		
7	12 000 мин ⁻¹	Конический Ø14 мм/Ø8 мм		
8	12 000 мин ⁻¹	Коническими каналами Ø14 мм/Ø8 мм и заборной выемкой		

Моделирование скорости потока воздуха в корпусе инструмента, вращающегося с частотой 12 000 мин⁻¹, с коническими отверстиями на входе Ø10 мм и на выходе Ø8 мм (поз. 6, таблица 2) показывает, что скорость потоков не сильно отличается от потоков в модели с цилиндрическими отверстиями Ø8. Однако на шкале для потоков на выходе из каналов конической формы больше преобладает желтый цвет, который соответствует примерно 21 м/с.

Моделирование изменения потоков воздуха с увеличенным диаметром входного конического отверстия до 14 мм (поз. 7, см. таблицу 2) свидетельствует, что скорость потоков увеличивается в полтора раза и достигает порядка 32 м/с.

В результате исследований было предложено доработать конструкцию корпуса режущего инструмента для комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей деталей путем исполнения сквозных конических каналов с размерами на входе 14 мм и на выходе 8 мм.

Кроме того, предложено на наружной поверхности корпуса инструмента для большего захвата воздуха сделать заборную выемку перед входом в конический канал, что привело к увеличению скорости потока на выходе из канала (поз. 8, см. таблицу 2).

Моделирование влияния предложенных изменений конструкции корпуса инструмента на температуру обработанной сферической поверхности в SOLIDWORKS Flow Simulation показало, что температура на поверхности детали снизилась на 15 °С (при заданной температуре поверхности детали в 110 °С), с заданным параметром вращения инструмента 12 000 мин⁻¹ на выходе из каналов скорость потока составила 20 м/с. На рисунке 12 изображено изменение температуры на поверхности детали в этих условиях.

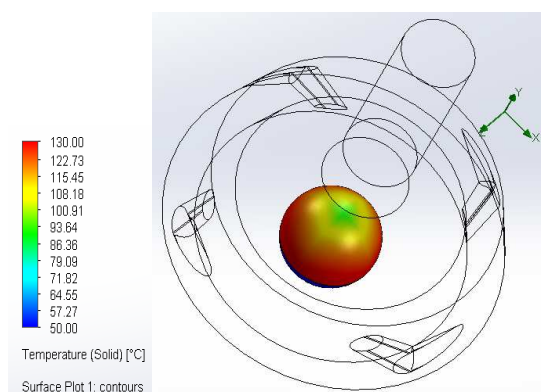


Рисунок 12. – Фрагмент моделирования изменения температуры на поверхности детали

Согласно результатам моделирования, уменьшения температуры поверхности детали на 15 °С недостаточно. В связи с этим в дальнейшем планируется рассмотреть конструкцию корпуса режущего инструмента с установкой специальных сопел на выходе конических отверстий, позволяющих направить поток воздуха непосредственно в зону резания.

Заключение. Таким образом, олучены математические формулы для расчета температуры нагрева заготовки цилиндрической формы и детали сферической формы при скоростной обработке, которые позволяют рекомендовать диапазоны изменения угла контакта (глубины резания) и линейных скоростей вращения инструмента и детали для регулирования значений температуры.

Экспериментально установлены зависимости температуры нагрева поверхности детали от времени скоростной обработки при различных значениях частот вращения инструмента и детали и их относительной подачи, что позволяет определить оптимальные значения режима обработки сферической поверхности детали в диапазоне значений частоты вращения инструмента 3000–12 000 мин⁻¹.

По результатам моделирования процессов охлаждения зоны резания и инструмента в программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation было предложено усовершенствовать конструкцию корпуса режущего инструмента, что обеспечивает управление тепловыми потоками при скоростной обработке неполных сферических поверхностей детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмельницкий Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Приклад/ науки. Пром-сть. – 2007. – № 8. – С. 53–58.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: [пер. с англ.]. – М.: Наука, 1964 – 487 с.
3. Богданова Е.А. Расчет температурного поля в цилиндрической детали при торцевом ротационном точении // Некоторые вопросы дифференциальных уравнений в решении прикладных задач. – Тула: Тул. политех. ин-т, 1983. – С. 79–81.

4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
5. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов и др. // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 2(55). – С. 87–97.

REFERENCES

1. Khmel'nitskii, R.S. (2007). Issledovanie protsessa obrabotki sfericheskikh poverkhnostei detalei sposobom okhvatyvayushchego frezerovaniya [Study of the process of processing spherical surfaces of parts using the method of enveloping milling]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 8, 53–58. (In Russ., abstr. in Engl.)
2. Karslou, G. & Eger, D. (1964). *Teploprovodnost' tverdykh tel [Conduction of heat in solids]*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
3. Bogdanova, E.A. (1983). Raschet temperaturnogo polya v tsilindricheskoi detali pri tortsevom rotatsionnom tochenii. *Nekotorye voprosy differentsial'nykh uravnenii v reshenii prikladnykh zadach (79–81)*. Tula: Tul'skii politekhnicheskii institut. (In Russ.)
4. Reznikov, A.N. (1981). *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov*. – Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
5. Popok, N.N., Khmel'nitskii, R.S., Anisimov, V.S. & Gvozd', G.I. (2017). Kompleksnye issledovaniya fizicheskikh i tekhnologicheskikh kharakteristik protsessa obrabotki sfericheskikh poverkhnostei detalei [Complex studies of physical and technological characteristics of the process of processing spherical surfaces of parts]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science]*, 2(55), 87–97. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 19.02.2024

**CONTROL OF HEAT AND COOLING FLOWS
IN RAPID MACHINING OF INCOMPLETE SPHERICAL SURFACES
OF MACHINE PARTS**

N. POPOK, R. HMELNITSKI, S. PORTYANKO
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

Combined rapid machining of incomplete spherical surfaces of parts is considered, formulas for calculating the cutting temperature taking into account the angle of contact between the tool and the workpiece are derived, the results of experimental studies of the temperature of the part and chips depending on the processing time, as well as modeling of cooling air flows in the tool and the cutting zone are presented.

Keywords: *temperature, heat flow, incomplete spherical surface, rapid machining, multi-blade cutting tool.*