

**В.А. Спирин, Е.В. Силукова, Ю.А. Селянинов, Л.С. Титова**

Пермский государственный технический университет

## **ТЕПЛОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГЛОБОИДНОГО ЗУБОХОНИГОВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Рассмотрены основные закономерности формирования термодинамических показателей при глобоидном зубохонинговании и основные факторы, определяющие выходные параметры процесса.

**Ключевые слова:** параметры формообразования, условия контакта, характеристика абразивного слоя, установившаяся температура.

Повышение качества выпускаемой продукции – решающее условие повышения ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. Это обуславливается постоянно возрастающими требованиями к надежности эксплуатации. К отдельным узлам и деталям предъявляются все более жесткие требования, так как эксплуатационные характеристики, надежность, долговечность, ресурс работы машин и механизмов зависят от отдельных узлов и сопрягающихся пар.

В конструкциях современных машин и механизмов широко распространены зубчатые передачи. Эксплуатационные свойства зубчатых передач в значительной мере определяются точностью изготовления зубчатых деталей и качеством рабочих поверхностей зубьев. В целях повышения эксплуатационных характеристик передач значительное место в технологии их изготовления отводится чистовой обработке.

Перечисленные требования особенно большое значение приобретают при изготовлении сложнопровильных винтовых деталей, например рабочей пары винтового забойного двигателя. В настоящее время отсутствует высокопроизводительный, экономически обоснованный способ отделочной обработки сложнопровильных деталей, поэтому операция зубонарезания профильной части ротора часто является окончательной. Точность и шероховатость зубчатого венца ротора в этом случае определяется невысокими возможностями зубофрезерования.

Рабочая пара винтового забойного двигателя состоит из металлического ротора и резинового статора. Долговечность и работоспособность такой пары в значительной степени зависит от качества рабочих поверхностей ро-

тора. Исследования показали, что снижение шероховатости рабочих поверхностей ротора на один класс позволяет на 10–15 % повысить ресурс работы винтового забойного двигателя. В настоящее время с этой целью проводится дополнительная отделочная обработка.

К отделочным методам обработки относятся зубошлифование, зубошвингование, притирка, обкатка, полирование и суперфиниш, электрохимические и электрофизические методы обработки, а также зубохонингование.

В последнее время все шире в различных отраслях машиностроения применяется процесс зубохонингования. Это объясняется тем, что этот способ отделочной обработки обеспечивает требуемое по шероховатости качество, в отличие от зубошлифования обладает высокой производительностью, не шаржирует рабочей поверхности, как притирка, обеспечивает значительные съемы, в отличие от обкатки, полирования и суперфиниша, обладает более высокими точностными показателями, чем электрохимические и электрофизические методы обработки.

Наиболее интересным способом зубохонингования является обработка с использованием инструмента на основе глобоидного хона (червяка). Высокая производительность и качество обработки при глобоидном зубохонинговании обеспечиваются преимуществами глобоидного зацепления: профильный контакт и значительная протяженность контактных линий, наличие нескольких одновременно участвующих в зацеплении зубьев, образующих зону контакта, что приводит к осреднению погрешностей и повышению точности обработки, направление скорости резания практически совпадает с направлением вращения инструмента, что не требует для обеспечения заданных скоростей резания высоких частот вращения инструмента и позволяет использовать для реализации процесса серийно выпускаемые зуборезные станки с использованием кинематических связей, что обеспечивает процессу исправляющую способность. Все эти достоинства делают процесс зубохонингования глобоидными червячными хонами оптимальным при обработке сложнопрофильных зубчатых деталей значительной длины.

Широкому распространению глобоидного зубохонингования помимо технологических сложностей, связанных с изготовлением и правкой глобоидного инструмента, препятствует высокая чувствительность глобоидного зацепления к погрешностям установки инструмента, отсутствие на сегодняшний день надежных способов профилирования сложнопрофильных глобоидных инструментов, а также отсутствие функциональных зависимостей, позволяющих аналитически связать отклонения профиля детали с отклонениями параметров установки. Кроме этого, до конца не изучено влияние температур в зоне резания на точность обработки.

Для оптимизации технологического процесса глобоидного зубохонингования необходимо учитывать тепловые процессы, происходящие в зоне обработки. Температура на поверхности контакта режущего зерна с деталью характеризует напряженность процесса зубохонингования, влияет на интенсивность износа круга и качество поверхности детали. Для оптимизации параметров обработки, таких как материал хона, технологические наладки, режимы резания, необходимо знать температуры, возникающие в зоне контакта инструмента и детали. Кроме того, необходимо установить зависимости между температурой и изменением технологических наладок, режимов резания и параметрами абразивного слоя.

Решение теплодинамической задачи возможно на основе данных о напряженно-деформированном состоянии, возникающем в каждой точке профиля в зоне контакта инструмента с заготовкой. Смысл ее заключается в том, что помимо определения температур в зоне контакта можно определить поведение детали в процессе обработки.

На величину температуры при глобоидном зубохонинговании оказывают влияние следующие факторы:

1. Конфигурация области контакта.
2. Источник теплоты, который зависит от:
  - работы сил трения в процессе обработки;
  - количества теплоты, выделяемого в процессе обработки;
  - времени и площади контакта.
3. Скорости вращения заготовки и инструмента.
4. Величины подачи.
5. Теплофизические характеристики материала заготовки и инструмента.

Методы математической физики, в частности методы интегральных преобразований, позволяют эффективно решать сравнительно узкий круг задач теории теплопроводности. При рассмотрении систем дифференциальных уравнений с весьма общими краевыми условиями точные методы решения наталкиваются на большие трудности, особенно при решении нелинейных задач. В этих случаях приходится обращаться к тем или иным численным методам решения. Важно отметить, что использование численных методов позволяет отказаться от упрощенной трактовки математической модели процесса. В настоящее время наиболее распространенным методом решения уравнений теплопроводности является метод сеток (метод конечных разностей).

Сущность метода конечных разностей состоит в аппроксимации искомой непрерывной функции совокупностью ее приближенных значений, рассчитанных в точках исследуемой области тела, называемых узлами. Совокупность узлов, соединенных между собой определенным образом, представляет собой сетку, которую называют дискретной моделью области определения искомой функции. Совокупность значений искомой функции в узлах сетки называют сеточной функцией.

Этапы метода конечных разностей:

1. Построение сетки в области определения значений искомой функции. Этот этап называют дискретизацией задачи.

2. Замена производных в математической модели искомой функции их разностными аналогами, при этом непрерывная искомая функция аппроксимируется сеточной функцией. Этот этап называется алгебраизацией задачи.

3. Решение полученной системы алгебраических уравнений относительно узловых значений сеточной функции.

Исследования проводились с применением компьютерных технологий, с помощью пакета лицензионных программ STAR-CD, работающего по методу конечных разностей. Применение этой программы для расчета тепловых процессов при глобоидном зубохонинговании проводилось впервые, поэтому для расчета использовалась упрощенная модель глобоидного зацепления (рис. 2).

Модель реального зацепления представлена на рис. 1.

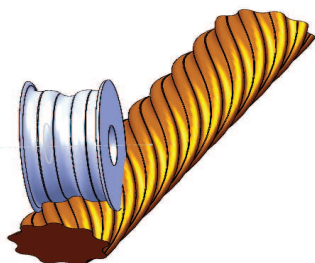


Рис. 1. Модель глобоидного зубохонингования

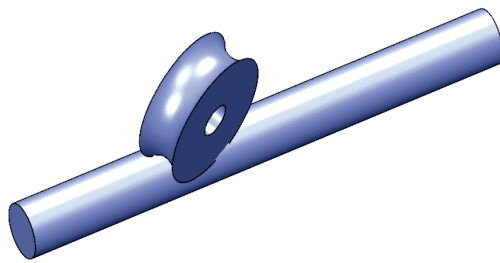


Рис. 2. Упрощенная модель глобоидного зубохонингования

С помощью этой модели на основе НДС разработан алгоритм определения источника теплоты. Нормальная составляющая силы резания  $P_y$ , Н, зависит от деформации и напряжения и находится по формуле

$$P_y = \sigma \delta^2,$$

где  $\sigma$  – напряжение, Н/мм<sup>2</sup>;  $\delta$  – деформация, мм.

Сила резания определяется для каждой из 30 точек профиля. После расчета значений силы резания в каждой из 30 точек при определенных условиях обработки найдем ее среднее значение, благодаря которому определим источник теплоты.

Предположим, что вся работа сил трения переходит в тепло, тогда определим силу трения  $F$ , Н:

$$F = P_y f,$$

где  $f$  – коэффициент трения,  $f = 0,1$ .

Количество теплоты  $Q$ , Дж, равное работе, можно определить по формуле

$$Q = F\delta_y.$$

Величина  $\delta_y$  является переменной и различна для каждой из точек профиля, также она зависит от параметров установки глобоидного хона и материала инструмента и детали. Значение этой величины осредняем.

После нахождения количества теплоты определить источник теплоты  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, можно по формуле

$$q = \frac{Q}{S\tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время контакта;  $S$  – площадь контакта;  $S = lh$ , м<sup>2</sup>,  $h$  – ширина контакта, является величиной переменной, различна для каждой точки профиля, равна величине деформаций по оси  $X$ . Для расчетов принимаем ее среднее значение.

Определим время контакта  $\tau$ , с:

$$\tau = \frac{th}{c},$$

где  $c$  – средняя длина окружности инструмента;  $v$  – скорость вращения инструмента;  $t$  – время контакта,  $t = \frac{c}{V}$ .

Из формулы (1) видно, что источник теплоты зависит прямо пропорционально от силы резания и обратно пропорционально от площади и времени контакта. Также источник теплоты зависит от характеристик абразивного инструмента. На рис. 3. представлено изменение источника теплоты в зависимости от характеристик инструмента.

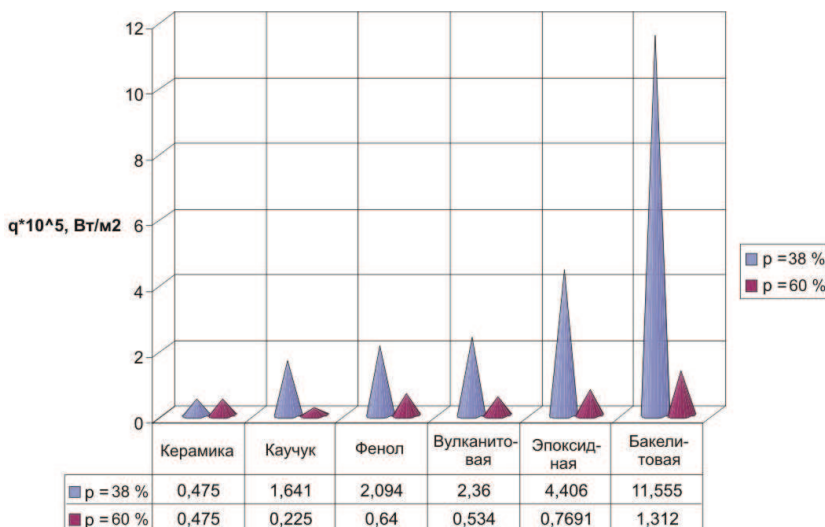


Рис. 3. Изменение источника теплоты при различных видах связки. Алмаз.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

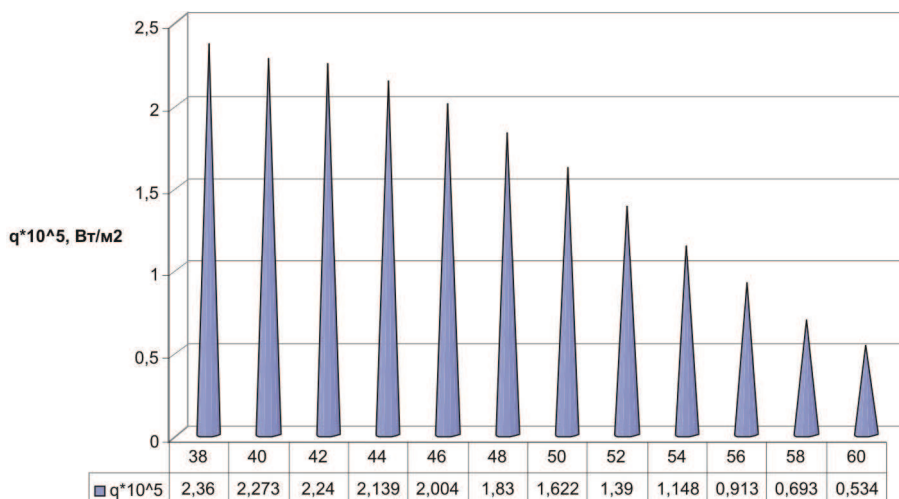


Рис. 4. Изменение источника теплоты при изменении концентрации алмазов вулканитовой связки.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

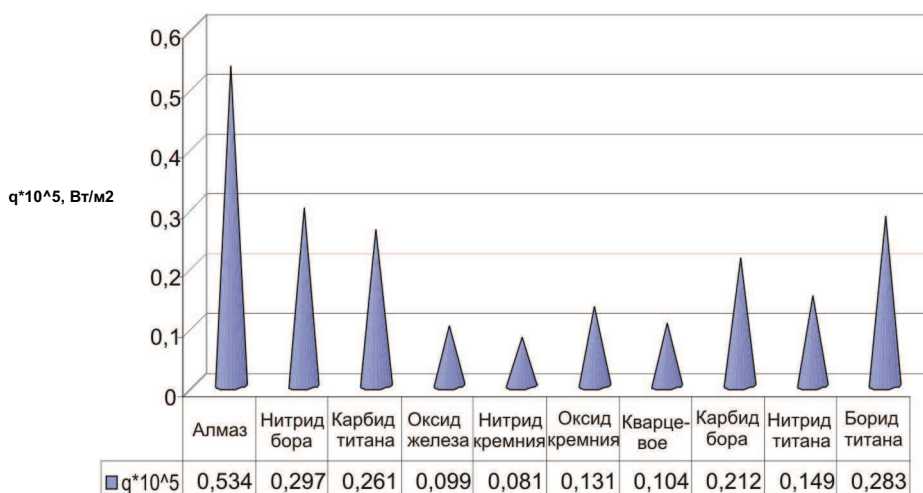


Рис. 5. Изменение источника теплоты при изменении вида абразива при  $p = 60 \%$ , в вулканитовой связке.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

Немалое влияние на температуру оказывают теплофизические свойства материала, причем как материала инструмента, так и материала детали. Поскольку материал глобидного хона является неоднородным и состоит из связки, абразивных включений, воздушных пор, то при определении теплофизических свойств материала инструмента в целом необходимо учитывать свойства каждого элемента, входящего в состав материала.

На рис. 4, 5 представлены результаты числового эксперимента при изменении указанных параметров абразивного слоя.

Общие формулы для расчета теплофизических характеристик инструмента:

$$\lambda = \lambda_1 m_1 + \lambda_2 m_2 + \dots + \lambda_n m_n, \text{ Вт/м}\cdot\text{К},$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – коэффициенты теплопроводности всех  $n$  компонентов круга,  $m_1, \dots, m_n$  – массовые доли компонентов.

Аналогичным образом можно определить среднюю плотность круга,  $\text{кг/м}^3$ , и удельную теплоемкость,  $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ :

$$\rho = \rho_1 m_1 + \rho_2 m_2 + \dots + \rho_n m_n,$$

$$c = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n.$$

Коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

характеризует связь между всеми свойствами.

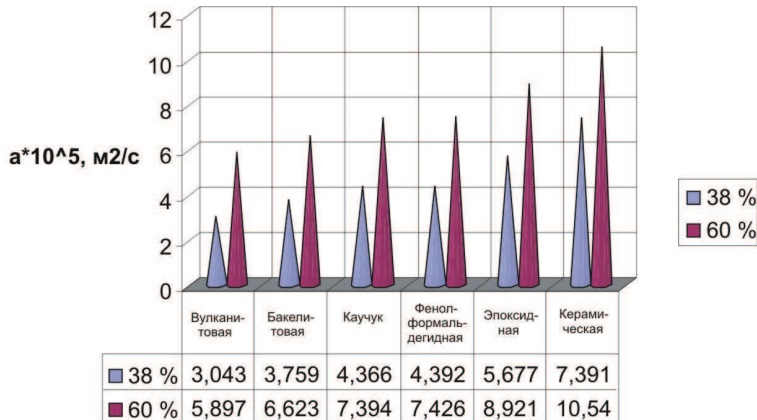


Рис. 6. Изменение коэффициента температуропроводности при различных видах связки. Алмаз.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

На рис. 6–8 изображены диаграммы и график расчетных изменений коэффициента температуропроводности при указанных изменениях абразивного слоя.

Из графиков видна следующая зависимость:

– с увеличением плотности связки коэффициент температуропроводности уменьшается. Это можно объяснить тем, что коэффициент температуропроводности прямо пропорционален теплопроводности и обратно пропорционален плотности и теплоемкости, большее значение среди этих параметров имеет плотность, поэтому она оказывает большее влияние на температуропроводность;

– с увеличением концентрации абразива коэффициент температуропроводности увеличивается.



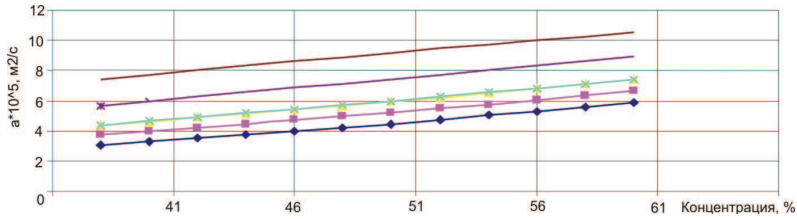


Рис. 7. Изменение коэффициента температуропроводности при изменении концентрации алмазов.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

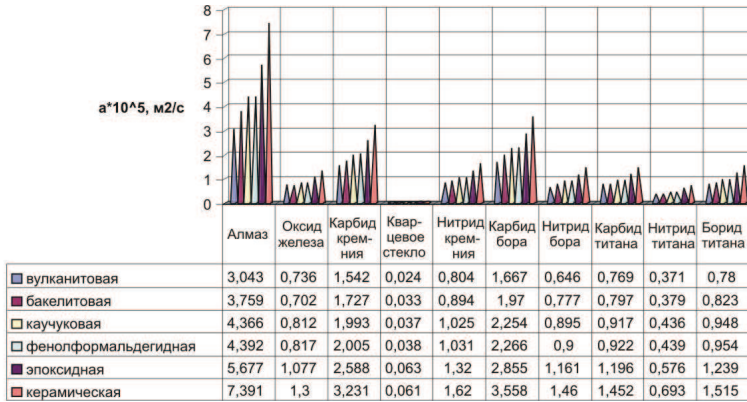


Рис. 8. Изменение коэффициента температуропроводности при изменении вида абразива.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

После определения исходных данных с помощью пакета лицензионных программ рассчитаны изменения температур в процессе обработки при одних и тех же параметрах технологических наладок и характеристик абразивного слоя при скорости вращения инструмента 25 м/мин и 30 м/с.

Рассмотрим температуру при скорости вращения инструмента  $V = 25$  м/мин. На рис. 9. представлен график изменения температуры в зоне обработки при изменении скорости резания.

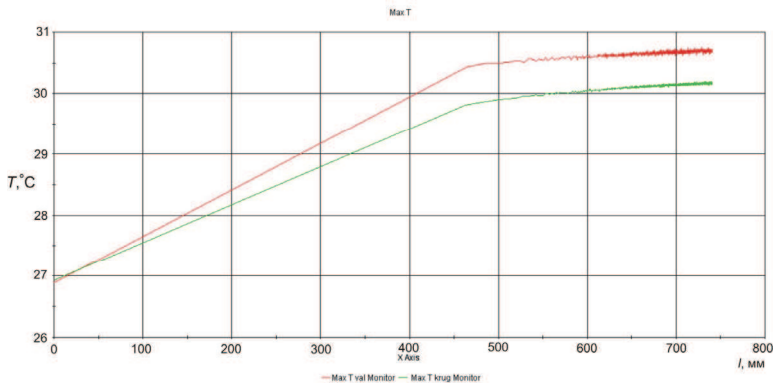


Рис. 9. График изменения температур ротора и глобоидного хона,  $V = 25$  м/мин. Каучук, алмаз  $p = 38$  %.  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$



Изменения температуры и температурных полей на детали и инструменте представлены на рис. 10–16.

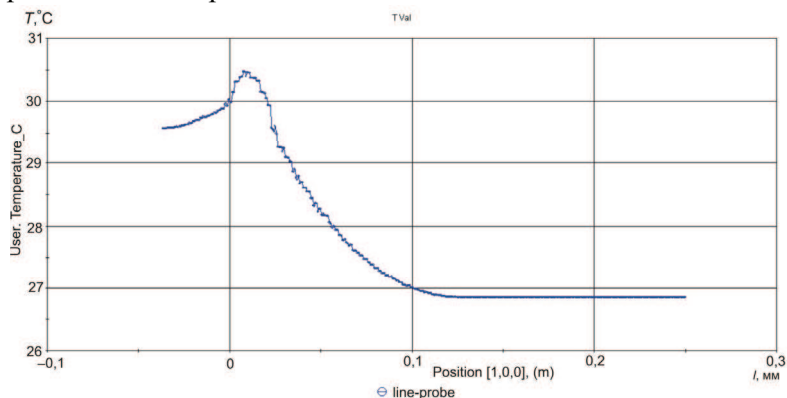


Рис. 10. График изменения температуры ротора по длине.  
Каучук, алмаз  $p = 38\%$ .  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

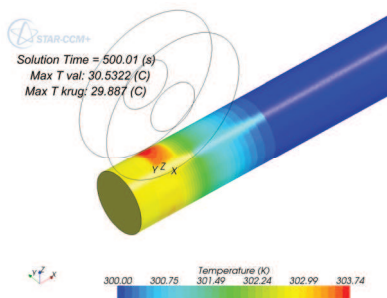


Рис. 11. Распределение температурных полей по поверхности ротора,  
 $V = 25$  м/мин

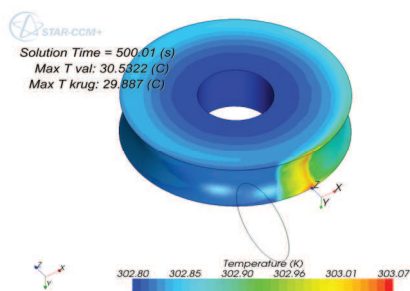


Рис. 12. Распределение температурных полей по поверхности глобоидного хона,  
 $V = 25$  м/мин

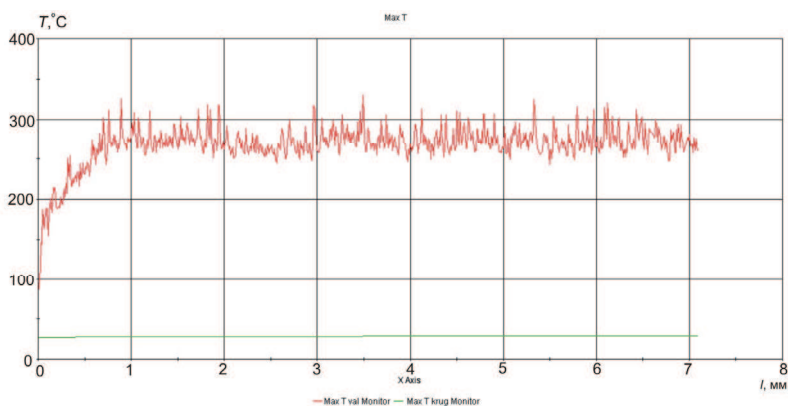


Рис. 13. График изменения температур ротора и глобоидного хона. Каучук, алмаз  $p = 38\%$ .  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

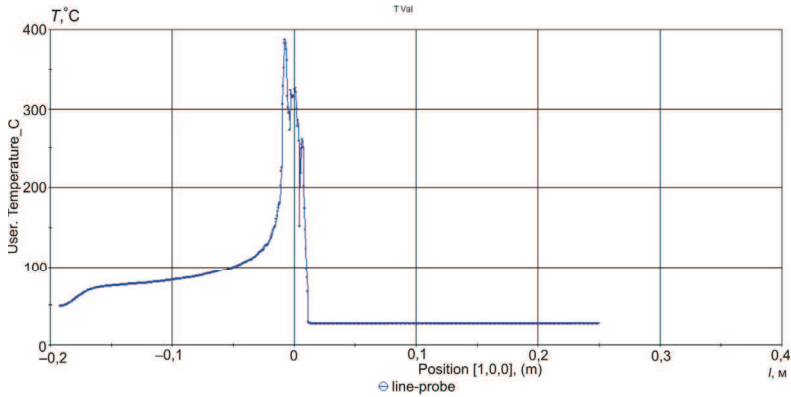


Рис. 14. График изменения температуры ротора по длине.  
Каучук, алмаз  $p = 38\%$ .  $dA = -0,5$ ,  $dZ = 0$ ,  $dG = 0$

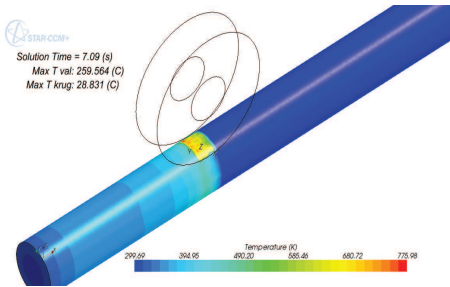


Рис. 15. Распределение температурных полей по поверхности ротора  
 $V = 30$  м/с

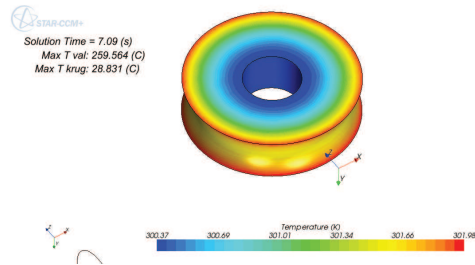


Рис. 16. Распределение температурных полей по поверхности глобоидного хона  
 $V = 30$  м/с

Рассмотрим изменение температуры при скорости вращения инструмента  $V = 30$  м/с. Исследования показали, что при небольших скоростях вращения инструмента температуры в зоне обработки невысоки (порядка 30–40 °С), что соответствует действительности, и значения температур инструмента и детали отличаются незначительно. Стационарный режим теплообмена устанавливается не сразу, а через некоторое время после начала обработки. Время наступления стационарного режима в большей степени зависит от скорости движения источника теплоты: чем выше скорость, тем быстрее установится процесс теплообмена. Также получили распределение температурных полей по поверхности детали и инструмента, откуда видно, что при небольших скоростях вращения инструмента тепло концентрируется в зоне контакта.

При повышении скоростей до уровня скоростей шлифования температура детали повышается (около 300 °С). Температура инструмента по прежнему остается невысокой (30 °С). Это объясняется тем, что инструмент вращается с высокой скоростью и тепло равномерно распределяется по всей его

поверхности, а на детали – концентрируется в зоне контакта. Это видно из диаграммы распределения температурных полей по поверхности инструмента и детали. Стационарный режим теплообмена при таких скоростях устанавливается практически сразу после начала обработки (менее чем через 1 с).

Таким образом расчет температур произведен для упрощенной модели глобоидного зацепления. Получены значения температур для процессов зубохонингования и зубошлифования. Для расчета температур использовался источник теплоты, который представляет собой плотность распределения теплового потока на контактной площадке. Разработана методика расчета источника теплоты из напряженно-деформированного состояния. Таким образом, получили, что величина источника зависит от сил резания (напряжения и деформации) и величины контактной площадки (величины внедрения). В то же время методика требует дальнейшей проработки.

Проведены теоретические исследования для некоторых параметров абразивного слоя, результаты исследований изложены графически. Исследования проводились с помощью пакета лицензионных программ STAR-CD. Программа показала свою работоспособность и может использоваться для дальнейших испытаний при уточнении исходных данных. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 303 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 816 с.
3. Наерман М.С., Попов С.А. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками. – М.: Машиностроение, 1971. – 71 с.
4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 101 с.
5. Обработка металлов резанием, справочник технолога / под ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 1988. – 503 с.
6. Расчет температурных полей численным методом (методом сеток): метод. указания / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. – 16 с.
7. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
8. Спирин В.А. Повышение качества обработки сложнопрофильных зубчатых деталей: автореф. ... дисс. канд. техн. наук / Перм. политехн. ин-т. – 1988. – 216 с.
9. Тепловые процессы в технологических системах. Под. ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 381 с.

10. Теплофизика процессов механической обработки материалов / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1981. – 186 с.

11. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 105 с.

12. Цепков А.В., Спирин В.А., Серебренник Ю.Б. Финишная обработка роторов винтовых забойных двигателей / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1984. – 32 с.

Получено 12.01.2011