

Рис. 4.  
Эксперимент на сдвиг листа графена

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
2. Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование / Под ред. В.А. Левина М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
3. Василевский Ю., Данилов А. Взаимодействие с САПР для построения расчетных сеток в сложных областях // Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. 2009. Т. 39. С. 5–12.
4. Kaser M., Dumbser M. An arbitrary high-order discontinuous Galerkin method for elastic waves on unstructured meshes – II. The three-dimensional isotropic case // Geophys. J. Int. (2006) 167.
5. Komatitsch D., Barnes C., Tromp J. Wave propagation near a fluid-solid interface: A spectral-element approach // Geophysics. 2000. Vol. 65, N 2. P. 623–631.
6. Levin V.A., Zingerman K.M., Vershinin A.V., Freiman E.I., Kukushkin A.V., Trachenko A.V. Development and use of the CAE-system "FIDESYS" for nonlinear analysis of solids with microstructure that changed during loading /Keynote/. ECCM. Paris, 2010. — [https://www.eccm-2010.org/abstract\\_pdf/abstract\\_1650.pdf](https://www.eccm-2010.org/abstract_pdf/abstract_1650.pdf).
7. Levitas V. I., Levin V. A., Zingerman K. M., Freiman E. I. Displacive phase transitions at large strains: Phase-field theory and simulations // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, N 2. 025702.
8. Mazo M.A., Manevich L. I., Gusarova E.B., Shamaev M.Yu., Berlin A.A., Balabaev N.K., Rutledge G.C. Computer simulation of thermo-mechanical properties of layered nano-crystals for the example of montmorillonite crystal // Russian Journal of Mathematical Physics. Vol. 15, N 3. 2008. P. 419–421.

## Использование параллельных технологий для моделирования процесса теплообмена при изготовлении сложных изделий



## 26 Использование параллельных технологий для моделирования процесса теплообмена при изготовлении сложных изделий

Появление на рынке высокопроизводительных программных комплексов позволило сократить стадии проектирования различных машиностроительных конструкций и исследования процессов, протекающих (возникающих) при их эксплуатации. Использование многопроцессорных вычислительных систем дает возможность в сравнительно короткие сроки проводить многочисленные исследования различных характеристик проектируемых объектов, что позволяет изменять их конструкцию без создания экспериментальных образцов и не прибегать к длительной и дорогостоящей процедуре натурных экспериментов.

### АВТОРЫ:

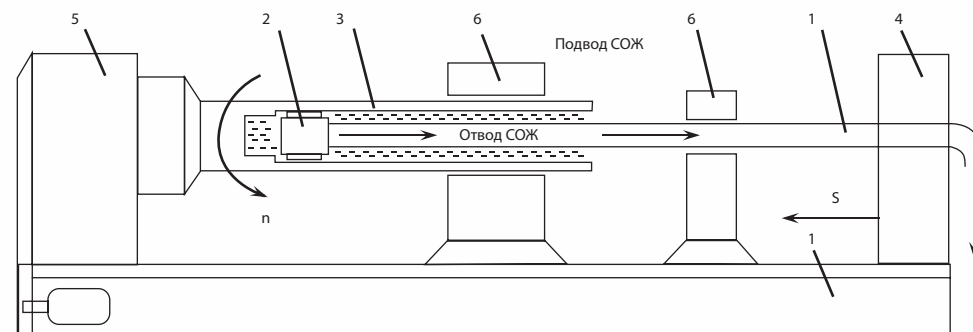
**В.Н. Комаров** – докт. тех. наук, проф., зав. каф. прикладной математики факультета ВМК ННГУ, Нижегородский гос. университет им. Н.И.Лобачевского;  
e-mail: kovn3@uic.nnov.ru

**А.В. Грезина** – канд. физ.-мат. наук, доц. каф. прикладной математики факультета ВМК ННГУ, Нижегородский гос. университет им. Н.И.Лобачевского;  
e-mail: aleksandra-grezina@ya.ru

**С.А. Артемьева** – специалист центра технической поддержки ООО «ТЕСИС»;  
e-mail: artemeva@capvidia.nnov.ru

Растачивание глубоких отверстий на токарных станках относится к числу наиболее трудоемких процессов обработки, что обусловлено тяжелыми условиями их протекания, в частности необходимостью обильной и непрерывной подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Применение смазочно-охлаждающей жидкости необходимо для отвода стружки из зоны резания и транспортировки ее по отводным каналам, для уменьшения силы резания и трения между направляющими элементами и поверхностью обрабатываемого отверстия, отвода тепла, образующегося в процессе резания и трения. При уменьшении температуры в зоне резания уменьшается также износ режущего инструмента и затраты энергии на резание. Заметим, что уменьшение температуры в зоне резания и температуры циркулирующей СОЖ оказывает решающее влияние на точность и производительность труда при чистовой обработке отверстий [1].

Исследование процесса теплообмена, протекающего между рабочим инструментом, СОЖ и обрабатываемой деталью (рис. 1), с целью определения гидродинамических параметров, оптимальных для работы инструмента и качественной обработки деталей, проведено с использованием технологий программного комплекса FlowVision-НРС.



**Рис. 1.** Расчетная схема токарного станка [1]: 1 – стембель борштанги, 2 – расточная головка, 3 – обрабатываемая деталь, 4 – суппорт, 5 – шпиндельная бабка, 6 – люнеты, 7 – станина

Разработанная расчетная модель включает в себя три элемента: обрабатываемую деталь, стембель борштанги и расточную головку. Моделирование в программном комплексе FlowVision течения СОЖ в проточной части, образуемой внутренним и внешним каналом борштанги, а также внутренней поверх-



ностью обрабатываемой детали, выполнено в рамках модели турбулентного течения несжимаемой жидкости. Рассматривался случай подачи СОЖ по внешнему каналу между наружной поверхностью инструмента и поверхностью обработанного отверстия в заготовке. Отвод СОЖ осуществляется по внутреннему каналу (рис. 1). Нагретая СОЖ протекает между инструментом и деталью, температура которых в начальный момент времени близка к комнатной. В исследуемой задаче учитывалось взаимодействие между тремя подобластями, то есть учитывался сопряженный теплообмен между СОЖ, обрабатываемой деталью и рабочим инструментом.

В рассматриваемой проточной части имеется зазор между направляющими элементами расточной головки и внутренней поверхностью обрабатываемой детали. С целью корректного моделирования течения СОЖ в зазоре применялась модель зазора. Для вращения обрабатываемой детали вокруг собственной оси использовался элемент «Вращение». Данный элемент программного комплекса FlowVision позволяет в выбранной системе координат учитывать вращение элементов геометрии посредством добавления вращательной скорости на их поверхности. Вращение задавалось на граничном условии, соответствующем поверхности обрабатываемой детали. На входе во внешний канал (проточную часть, создаваемую наружной поверхностью инструмента и поверхностью обработанного отверстия в заготовке) задавалась нормальная составляющая массовой скорости течения СОЖ и начальная степень турбулизации потока рабочего вещества. Также на входе была задана температура подаваемой СОЖ. На выходе из внутреннего канала задано условие нулевых возмущений по статическому давлению. На внешних стенках обрабатываемой детали задавалось значение температуры и условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости. В зоне резания определялось граничное условие непротекания. Исследования теплообмена проводились при различных значениях начальных температур СОЖ на входе и в зоне резания в диапазонах, соответствующих реальным режимам обработки. На внутренних поверхностях обрабатываемой детали и на поверхностях инструмента определялось граничное условие типа «Связанное».

Расчетная область и система граничных условий представлены на рис. 2.

В ходе исследования процесса теплообмена проведена серия экспериментов при различных значениях температуры в зоне резания и температуры подаваемой СОЖ. Выявлены зависимости температуры на выходе от температуры в зоне резания. Получены картины распределения температуры в области зоны резания.

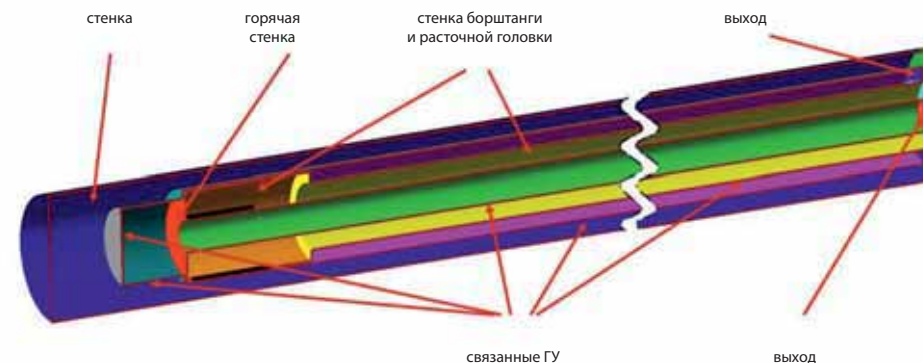


Рис. 2.  
Расчетная область и система граничных условий

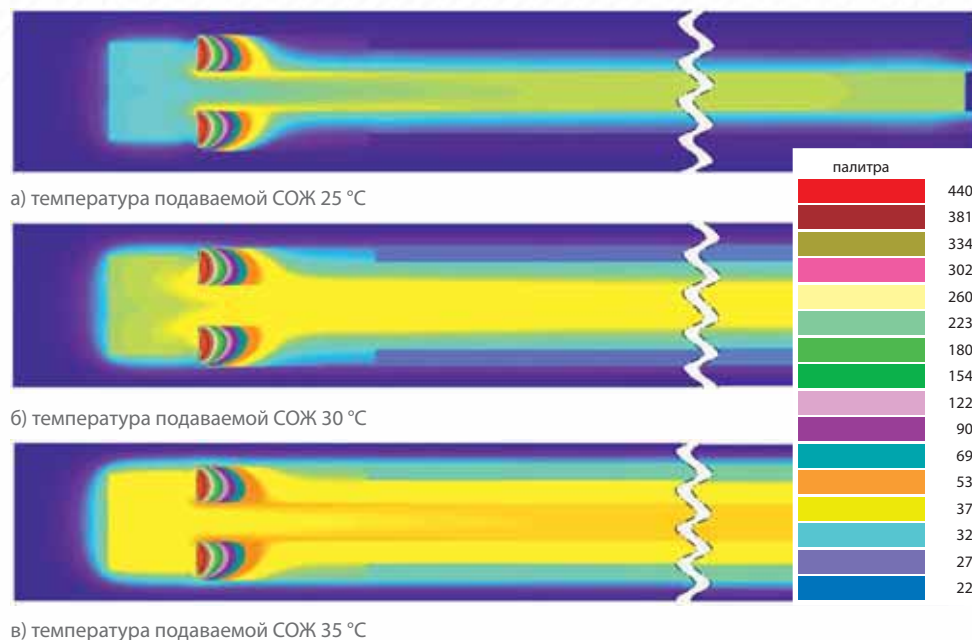
Для численного моделирования физические параметры СОЖ (плотность, молекулярная динамическая вязкость, теплопроводность и удельная теплоемкость), являющиеся константами, и технические характеристики станка для обработки глубоких отверстий были взяты из специализированной литературы [1, 2]. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости был выбран продукт ECOCUT HFN 5 LE. ECOCUT HFN 5 LE —охлаждающая жидкость на основе высококачественного базового масла с повышенными антикоррозийными свойствами и стойкостью к старению [2]. Физические же параметры обрабатываемой детали и инструмента являлись функциями давления и температуры.

Корректность полученного численного решения проверялась на основе аналитических оценок и экспериментальных данных, представленных в специализированной литературе.

На рис. 3 приведены картины распределения поля температуры в плоскости симметрии модели для температуры в зоне резания  $600^{\circ}\text{C}$  и различных значениях температуры подаваемой СОЖ ( $25, 30, 35^{\circ}\text{C}$ ).

Из рисунков видно, что при течении СОЖ по внешнему каналу происходит ее незначительное охлаждение за счет теплообмена с обрабатываемой деталью и инструментом. Область же максимальных температур находится в зоне резания. Наибольшее изменение температуры наблюдается в расточной головке в этой зоне. Чем выше температура в зоне резания, тем значительнее происходит прогрев СОЖ и, как следствие, прогрев инструмента.

Анализ результатов исследования показал, что увеличение температуры в зоне резания незначительно влияет на температуру внутренней поверхности обрабатываемой детали, но оказывает влияние на температуру СОЖ на выходе



**Рис. 3.** Поля температур в плоскости симметрии модели при температуре в зоне резания  $T_r = 600\text{ °C}$

из внутренней полости стебля борштанги. Температура СОЖ на выходе при температурах в зоне резания  $600\text{--}800\text{ °C}$  удовлетворяет рекомендуемому диапазону, представленному в специализированной литературе. Результаты сравнения численного решения с аналитическими оценками и экспериментальными данными позволяет сделать вывод, что предложенная расчетная модель является адекватной и при соответствующей доработке, позволяющей учитывать геометрию инструмента, может быть использована при проектировании станков и составлении технологических карт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин Н.Ф. Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988.
2. [http://www.resurs-nafta.ru/index/php?option=com\\_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=i.25&sobi2Id=13&Itemid=2-17.06.2008](http://www.resurs-nafta.ru/index/php?option=com_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=i.25&sobi2Id=13&Itemid=2-17.06.2008).

## Технология параллельных вычислений теплогидравлики программы «САВАРЕТ»

