

*В современном проектировании широко используются различные программные пакеты, позволяющие анализировать проекты на каждом этапе процесса разработки. Из всего многообразия методов компьютерного анализа наиболее широко используется метод конечных элементов. На заре своего существования он применялся главным образом в строительной механике. Однако вскоре стало ясно, что метод конечных элементов имеет более широкую область применения в задачах теплопереноса, распределения электростатического потенциала, механики жидкостей, вибрационного анализа и многих других. С ростом вычислительных возможностей компьютеров расширился диапазон и возросла сложность задач, доступных решению методом конечных элементов.*

УДК 512.54:621.91:624.074

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ И ТЕПЛОФИЗИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. А.В. БЕЛЫЙ  
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск),  
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, С.В. СЫЧЁВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*На основании компьютерного моделирования методом конечных элементов в соответствии с экспериментальными данными рассмотрено стружкообразование, изнашивание и разрушение инструментов из быстрорежущей стали с покрытием из TiN и без покрытия. Показано, что уменьшение трения и создание теплового барьера для инструмента с покрытием приводит к перераспределению контактных нагрузок на передней и задней поверхностях режущего клина. Отмечено, что допустимый износ для инструмента с покрытием снижается, однако при этом резко падает интенсивность износа. Компьютерное моделирование позволило предложить рациональную геометрию инструмента с покрытием, обеспечивающую при контролируемом износе по задней поверхности инструмента достаточную прочность режущего клина.*

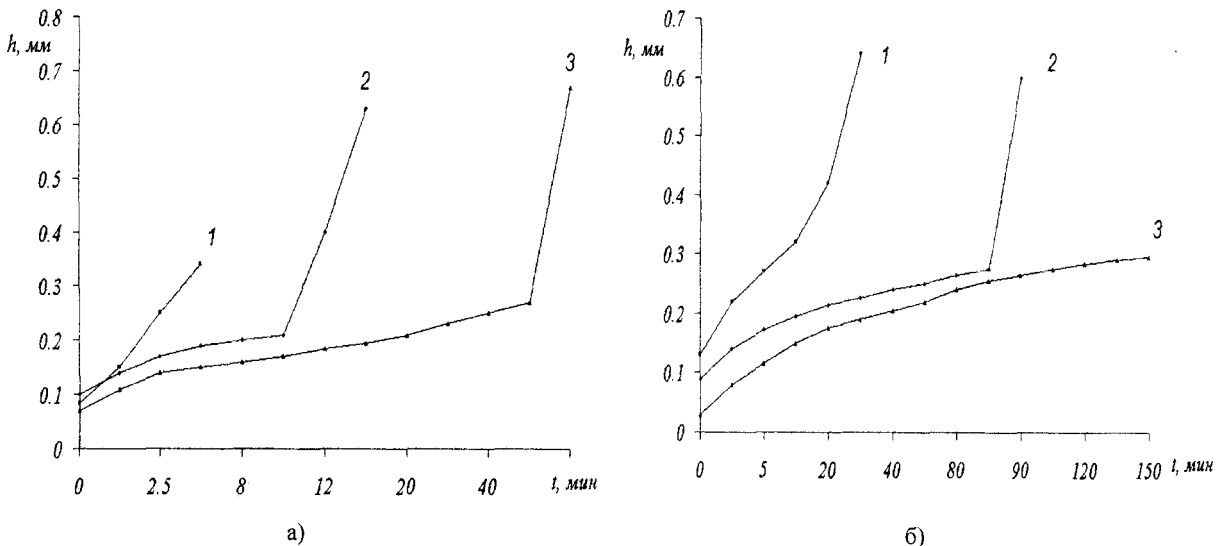
Покрyтия на основе тугоплавких соединений переходных металлов достаточно широко применяются в металлообработке для повышения стойкости режущего инструмента, увеличения производительности операций обработки резанием, улучшения качества обработанных поверхностей [1, 2]. В настоящее время отработаны технологии нанесения карбидных и нитридных покрытий и получение многослойных высокоэффективных и многофазных композиционных покрытий [3, 4]. Однако до сих пор до конца не выявлен механизм действия поверхностных покрытий на процессы трения и изнашивания режущих лезвий [5].

Для уточнения механизмов изнашивания и разрушения инструментов проводились эксперименты с резцами из быстрорежущей стали P6M5K5. Геометрия режущего лезвия была следующей: передний угол  $\gamma = 6^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 5^\circ$ ; углы в плане  $\phi = 75^\circ$  и  $\phi_1 = 15^\circ$ ; угол наклона режущей кромки  $\lambda = 5^\circ$ . Испытания проводились в условиях продольного точения чугуна СЧ30 без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Скорость резания изменялась в диапазоне от 40 до 80 м/мин; подача – от 0,035 до 0,28 мм/об; глубина резания – от 0,25 до 2,5 мм. Горизонтальную и вертикальную составляющие силы резания измеряли динамометром. Размер пятна контакта между инструментом и стружкой определяли растровым электронным микроскопом.

Основные экспериментальные зависимости представлены на рис. 1 и 2. Из полученных результатов следует, что применение покрытий TiN позволяет существенно повысить скорость обработки чугуна. Если у резцов без покрытия максимальная допустимая скорость резания не превышала 40 м/мин, то у резцов с покрытиями она достигала 65 м/мин.

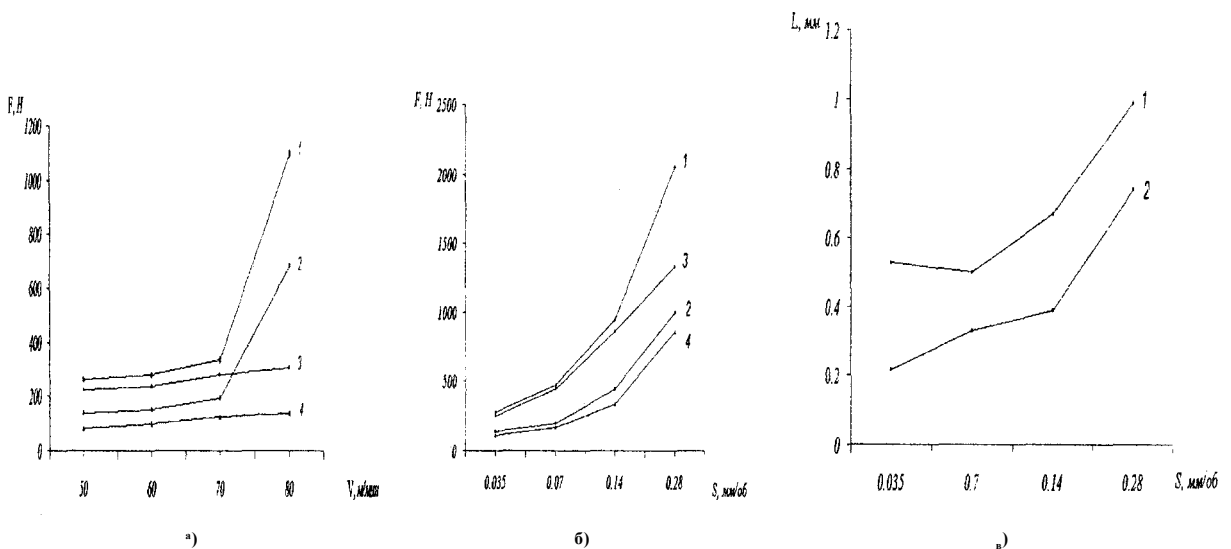
На кривых зависимости износа от скорости резания (рис. 1, а, б) можно выделить три фазы: приработка, установившийся износ и катастрофический износ. Переход к третьей фазе определяет стойкость инструмента.

Сопоставление кривых 1 и 2 (см. рис. 1, б) показывает, что фаза установившегося износа для инструмента с покрытием существенно больше, чем для неупрочненного инструмента. Вместе с тем использование покрытий приводит к тому, что катастрофический износ начинается при абсолютной величине износа меньшей, чем для инструмента без покрытия.



**Рис. 1. Зависимости износа резцов из стали P6MK5 по задней поверхности от времени:**  
**для инструментов без покрытий (а);**  
**для инструментов с покрытиями (б) при скоростях резания:**  
**1 – 65 м/мин; 2 – 50 м/мин; 3 – 40 м/мин**

На рис. 2, а, б приведены зависимости силы резания от скорости главного движения и подачи. Максимальный эффект от применения покрытий проявляется при больших скоростях главного движения и подачи.



**Рис. 2. Зависимости силы резания от скорости при подаче 0,035 мм/об (а):**  
**1 и 2 – инструмент без покрытия; 3 и 4 – с покрытием TiN;**  
**от подачи при скорости резания 40 м/мин (б):**  
**1 и 3 – вертикальная составляющая силы резания; 2 и 4 – горизонтальная составляющая силы резания;**  
**зависимости длины контакта между инструментом и стружкой от подачи при скорости резания 40 м/мин (в):**  
**1 – инструмент без покрытия; 2 – с покрытием TiN**

Испытания проводились при толщине покрытия 3 мкм. Попытка удвоить толщину покрытия показала, что в период приработки износ снижается на 40 %. В период установившегося износа его интенсивность также ниже у более толстого покрытия, вместе с тем стойкость инструмента с толстым покрытием оказалась примерно на 30 % ниже, чем с тонким. Этот результат говорит о невозможности свести износ твердых покрытий только к истиранию или абразивному действию, следует также учитывать накопление усталостных повреждений, приводящих в конечном итоге к разрушению покрытия посредством хрупкого скола и быстрого перехода к катастрофическому износу. Период приработки связан с формированием эксплуатационной шероховатости; установившегося износа - с накоплением усталостных повреждений и зарождением подповерхностных трещин по механизму отслаивания [6]. Наибольшая концентрация трещин локализована вблизи межфазной границы раздела, где расположен максимум остаточных напряжений.

Развитие трещины на границе «покрытие - подложка» приводит к снятию напряжений в покрытии и росту растягивающих напряжений в подложке, вызывающих в конечном итоге ее разрушение. С массовым выходом трещин на поверхность и разрушением подложки связана третья стадия - катастрофический износ. Снижение стойкости при удвоении толщины покрытий обусловлено ростом остаточных напряжений, достигающим по данным рентгеноструктурного анализа величины 2 ГПа. Величина напряжений на межфазной границе может быть еще выше.

Рост остаточных напряжений увеличивает вероятность хрупкого разрушения. В более тонких покрытиях вероятность хрупкого разрушения ниже, но одновременно снижается сопротивляемость абразивному износу.

Сравнение образцов из инструментальной стали Р6М5К5 с покрытием и без проводилось при следующих режимах: скорость резания - 50 м/мин, подача - 0,25 мм/об, глубина - 2,5 мм.

На поверхности образцов, работавших без покрытия, образовывался белый слой с выделениями карбидов, что свидетельствует об их нагреве до 1300 К и выше. Значительные температурные градиенты имеют место в приповерхностном слое толщиной около 35 мкм. Микроструктура образцов с покрытиями не содержит указанного белого слоя и свидетельствует о том, что температура в зоне резания не превышала 900 К; максимум поверхностной температуры у образцов с покрытиями расположен примерно в два раза ближе к режущей кромке. В несколько раз уменьшился размер и глубина лунки износа, центр которой в обоих случаях находится в области максимальной температуры.

Анализ получаемой стружки показал, что у резцов с покрытием при большой подаче наблюдаются более высокие температуры. Причина заключается в том, что помимо снижения тепловыделения при уменьшении трения, покрытие TiN служит тепловым барьером, снижающим долю теплового потока, распространяющегося из очага деформации в инструмент. Тепловой поток в стружку может возрастать, приводя к ее дополнительному нагреву. Так при резании стали резцами с покрытиями (подача - 0,28 мм/об), стружка оказывалась длиннее, а цвет ее менялся с синеватого на желтоватый.

Полученные результаты показывают, что нанесение покрытий TiN приводит к уменьшению трения между инструментальным и обрабатываемым материалом. Это означает, что результирующая сила резания изменяет свое направление, что приводит к увеличению угла сдвига и уменьшению длины контакта стружки по передней поверхности инструмента (рис. 3, а, б).

При трении резца без покрытия в начальный момент резания (рис. 3, б) образуется зона, очерченная сектором  $B_1OA_0$  (с углом сдвига  $\beta_0$ ), которая затем переходит в зону  $BOA$  определяющую длину  $\ell$  контакта стружки с передней поверхностью инструмента. При трении резца с покрытием, эпюра  $\sigma_x$  при врезании незначительно изменяет свою форму вследствие малого расширения площадки контакта  $\ell$  и перераспределения нагрузки в увеличившейся зоне  $\sigma_x$ . При трении резца без покрытия, часть эпюры, описывающей напряжения на передней грани  $\sigma_x$  меняет свою форму за счет увеличения  $\ell$  перемещения максимума контактных напряжений к вершине резца.

При значительном коэффициенте трения (резец без покрытия) максимальные напряжения располагаются ближе к вершине резца в результате большей степени деформации (упрочнения), которую получает обрабатываемый материал вследствие существования зоны  $BOA_0$  (рис. 3, б).

Перемещение инструмента в процессе резания приводит к возникновению касательных напряжений в зонах контактной деформации на передней  $\ell$  и задней  $h$  поверхностях (рис. 3, в, г).

Изнашивание резца, а значит увеличение площадки контакта по задней грани, приводит к дальнейшей трансформации напряженного состояния на передней и задней поверхностях инструмента (рис. 3, в, г). В результате отмеченного увеличения угла сдвига изменяется направление действия и точка приложения результирующей силы резания, и вследствие этого, меняется форма единой эпюры напряжений. Это приводит к удалению максимума напряжений от режущей кромки на передней грани инструмента и приближению максимальных значений напряжений к режущей кромке на задней грани в ре-

зультате преимущественного перемещения металла по передней поверхности. Смещение максимумов эпюры напряжений приводит к уменьшению сил на задней поверхности, снижению интенсивности износа, и уменьшению величины фаски износа на задней поверхности.

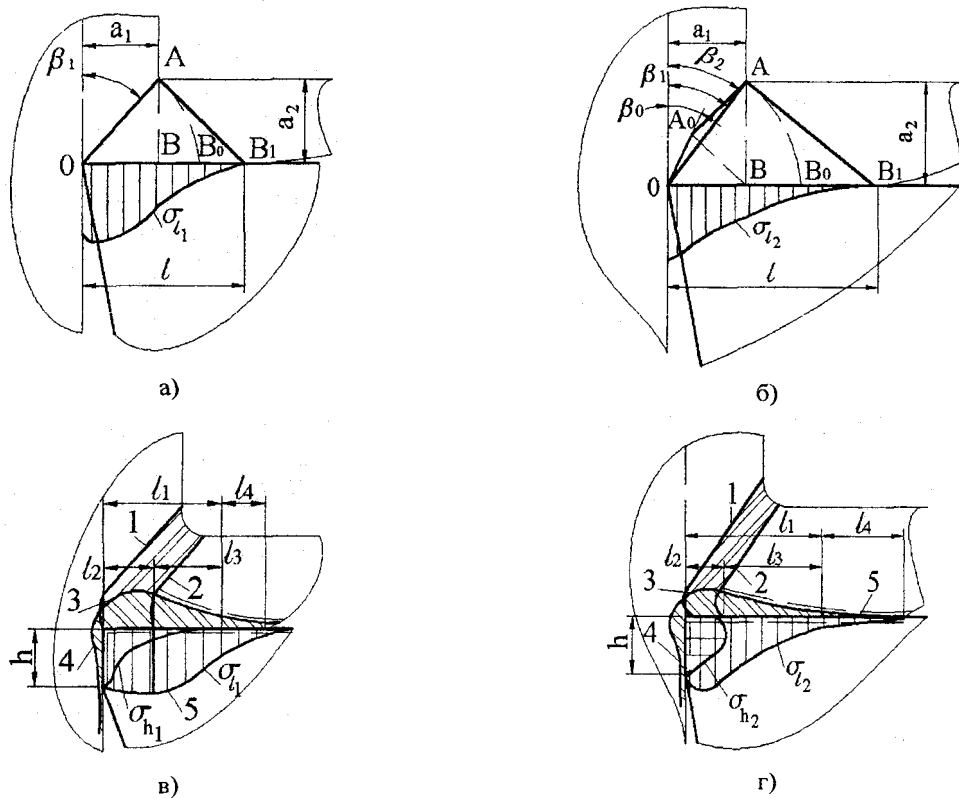


Рис. 3. Схемы процессов стружкообразования (а, б) и пластического деформирования (в, г) при малых (а, в) и значительных (б, г) силах трения:

- 1 – начальная граница зоны стружкообразования; 2 – конечная граница зоны стружкообразования;  
 3 – граница очага пластической деформации у передней поверхности; 4 – граница очага пластической деформации у задней поверхности; 5 – граница упруго-пластического слоя у передней поверхности;  $a_1$  – глубина резания;  $a_2$  – толщина стружки;  $h$  – длина контакта детали с задней поверхностью (фаска износа) инструмента;  $l$  – длина контакта стружки с передней поверхностью;  $\beta_0$  – угол сдвига в начальный момент врезания;  $\beta_1$  – угол сдвига при малом трении (инструмент с покрытием);  $\beta_2$  – угол сдвига при значительном коэффициенте трения (инструмент без покрытия);  
 $\sigma_{l_1}$  – распределение напряжений по передней поверхности инструмента при малом трении (инструмент с покрытием);  
 $\sigma_{l_2}$  – распределение напряжений по передней поверхности инструмента при значительном коэффициенте трения (инструмент без покрытия);  $\sigma_{h_1}$  – распределение напряжений по задней поверхности при малом трении;  
 $\sigma_{h_2}$  – распределение напряжений по задней поверхности при значительном коэффициенте трения

Предложенная модель влияния трибологических процессов, при использовании покрытий на режущем лезвии, на механику процессов стружкообразования использовалась при компьютерном моделировании ортогонального резания (рис. 4-6).

Краевые условия при трении (см. рис. 4) описывались для инструмента и заготовки на сетке конечных элементов, граничными условиями перемещения и температурой.

Инструмент фиксировался в пространстве, а скорость резания задавалась для заготовки (поверхности С - В - А - G).

Поверхность С - D - E - F - G принималась свободной и могла независимо двигаться в процессе моделирования.

Источники тепла в процессе резания моделировали тепловыделение в результате пластической деформации заготовки в первичной и вторичной зонах деформации, а также тепловые потоки, образующиеся вследствие трения между стружкой и передней поверхностью инструмента.

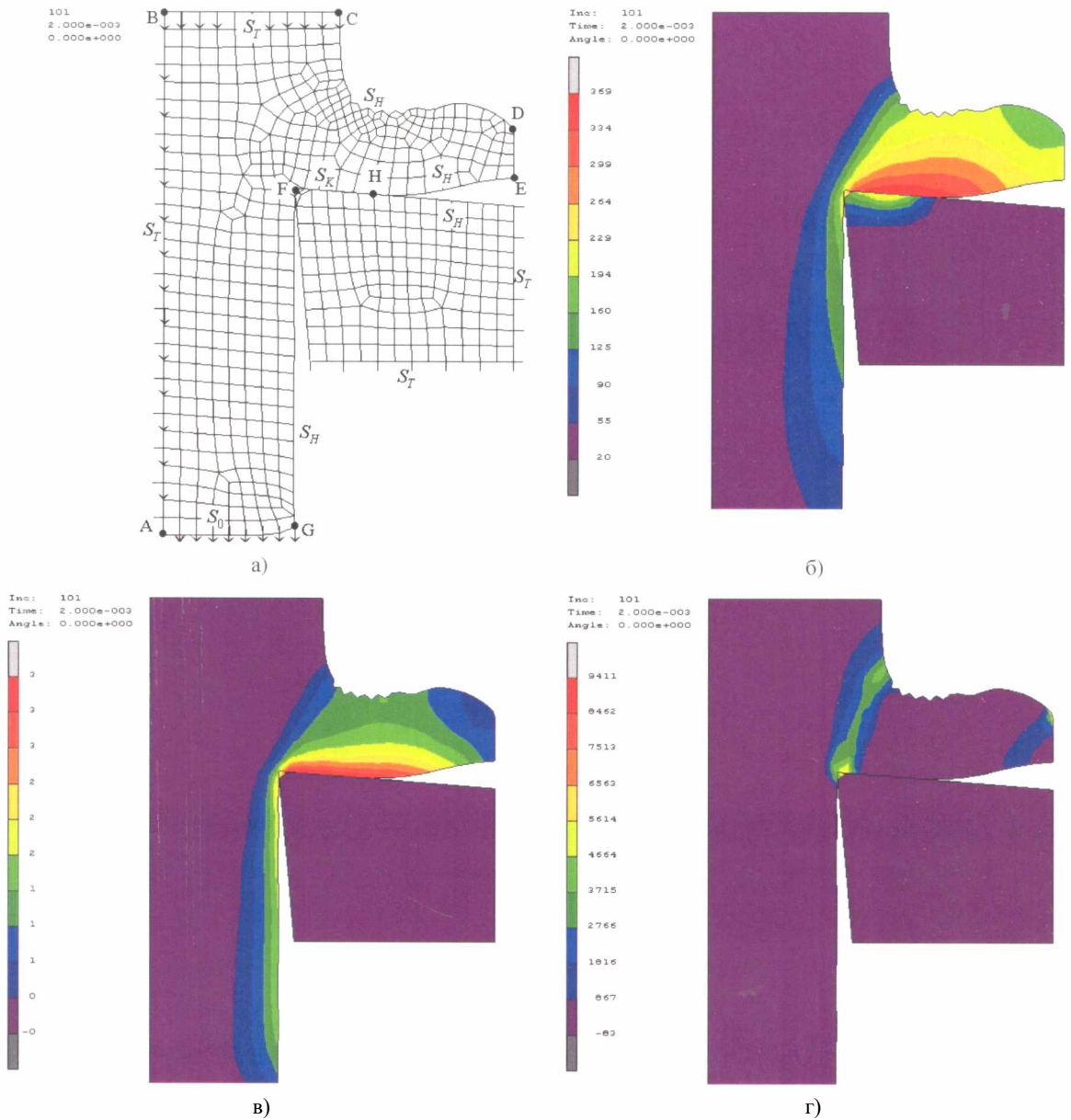


Рис. 4. Сетка конечных элементов и краевые условия (а), распределение температуры (б), пластической деформации (в) и скорости пластической деформации (г)

Для вычисления теплообмена были сделаны следующие допущения:

- 1) контакт стружка - инструмент принимался «идеальным», а коэффициент теплопередачи достаточно большим;
- 2) поверхности заготовки и инструмента вне зоны резания оставались комнатной температуры;
- 3) для свободных поверхностей заготовки, стружки и инструмента охлаждение учитывалось конвекцией воздуха.

Исходя из этого термические граничные условия (рис. 4, а):

$$T = T_{\infty} \text{ на } S_T ;$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_o (T - T_k) \text{ на } S_k ;$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\infty} (T - T_{\infty}) \text{ на } S_H ;$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ на } S_0,$$

где  $\lambda$  – теплопроводность;  $T_k$  – температура контакта стружки и инструмента;  $n$  – единичный вектор перпендикулярный граничной поверхности.

Коэффициент трения предполагался постоянным и определялся на основании экспериментальных данных. Процедура динамического анализа выполнялась по следующему алгоритму.

1. *Вычисление в узле.* Определяются ускорения, удовлетворяющие динамическому равновесию в начале приращения:

$$\ddot{u}_{(i)} = M^{-1} \left( P_{(i)} - I_{(i)} \right),$$

где  $\ddot{u}_{(i)}$  – ускорение в начале приращения  $I$ ;  $M$  – диагональная матрица;  $P_{(i)}$  – внешняя приложенная нагрузка;  $I_{(i)}$  – внутренняя нагрузка.

Ускорения интегрируются по времени, используя правило центральной разности:

$$\dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)} = \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)} + \frac{\left(t_{(i+1)} + t_{(i)}\right)}{2} \ddot{u}_{(i)}.$$

Скорости интегрируются по времени:

$$u_{(i+1)} = u_{(i)} + t_{(i+1)} \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}.$$

2. *Вычисления в элементе.* Приращение деформации элемента  $d\bar{\epsilon}$  определяется по скорости деформации  $\dot{d\bar{\epsilon}}$ , которая в свою очередь находится согласно скорости узлов.

Затем напряжение  $\sigma$  вычисляется из зависимостей описывающих свойства материала

$$\sigma = f \left( \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, \theta \right).$$

*Процедура температурного анализа.* При изучении формирования стружки, анализ напряжений зависит от распределения температуры, а распределение температуры зависит в свою очередь от напряжений. Поэтому использовался совместный термомеханический анализ. В нём уравнение теплопроводности интегрировалось по явному правилу интегрирования разности

$$\theta_{(i+1)}^N = \theta_{(i)}^N + t_{(i+1)} \dot{\theta}_{(i)}^N,$$

где  $\theta^N$  – температура в узле  $N$ .

*Моделирование стружкообразования.* Моделирование формирования стружки выполнялось с применением явного метода. Весь процесс резания разбивался на множество малых приращений времени. На каждом приращении выполнялись процедуры динамического и термического анализа, основанные на явном правиле интегрирования.

При моделировании ортогонального резания инструментом с износостойким покрытием было показано, что на характер стружкообразования и прочность режущего клина, помимо физико-механических и теплофизических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов (рис. 5), определяющее влияние оказывают трибологические характеристики покрытий (рис. 6).

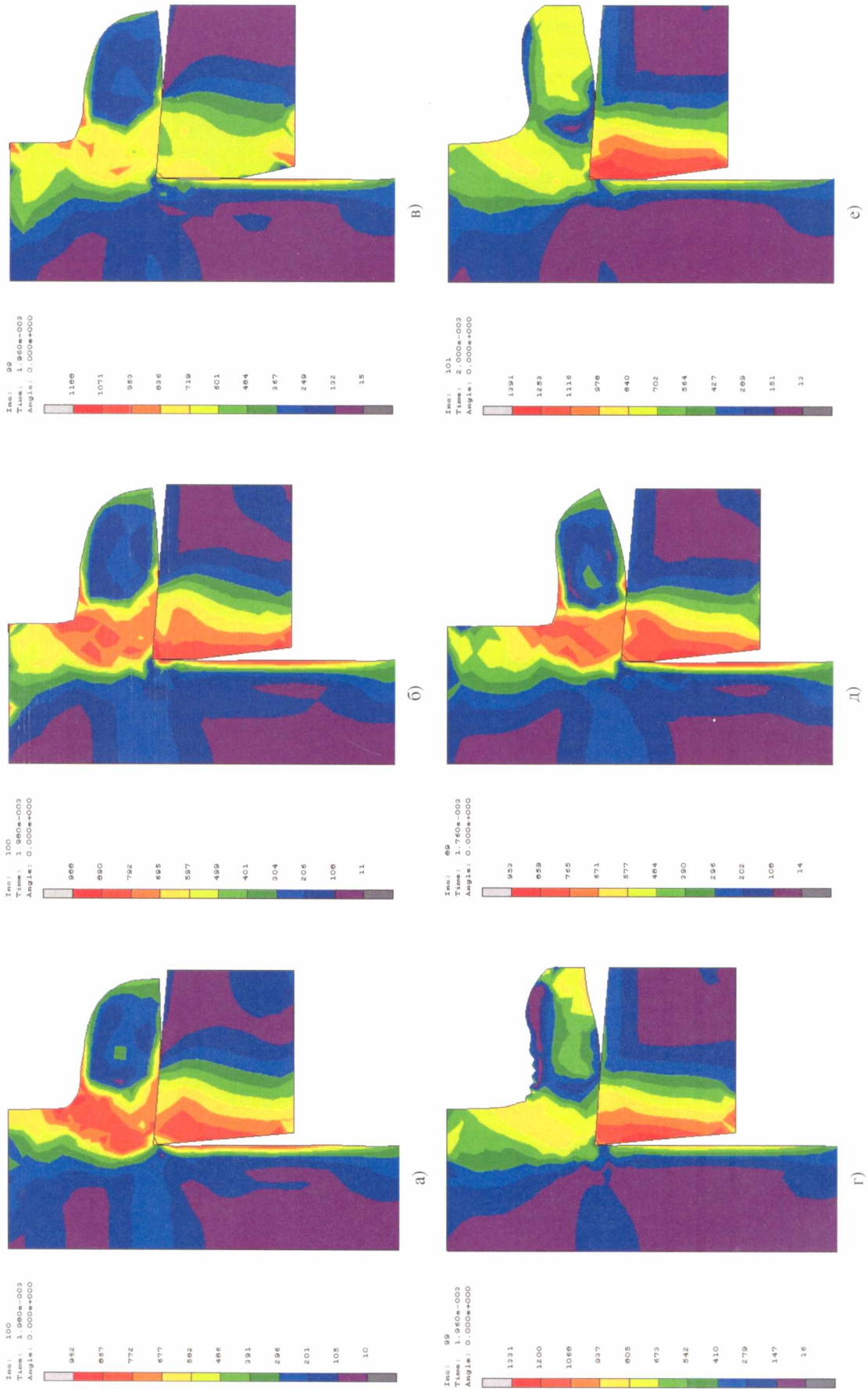


Рис. 5. Стружкообразование и распределение напряжений ( $\text{H}/\text{мм}^2$ ) в инструменте без покрытия (а, б, в) и инструменте с покрытием (г, д, е) в период приработки –  $h = 0,005$  мм (а, г), установившегося износа –  $h = 0,20$  мм (б),  $h = 0,30$  мм (д) и разрушения –  $h = 0,40$  мм (в),  $h = 0,60$  мм (е)



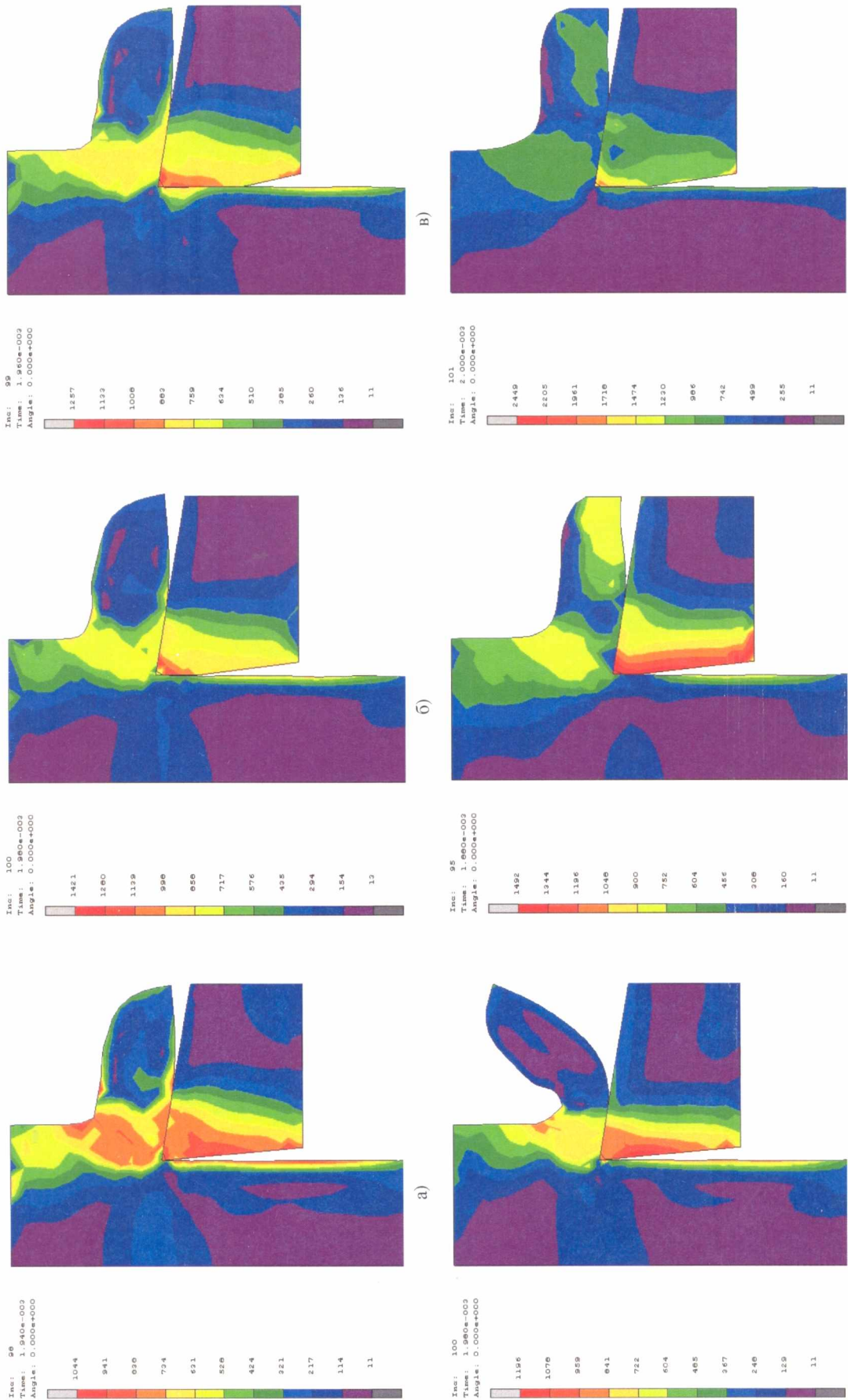


Рис. 6. Стружкообразование и распределение напряжений ( $\text{H}/\text{мм}^2$ ) в инструменте без покрытия (а, б, в) и инструменте с покрытием (г, д, е) при изменении угла заточки в период приработки –  $h = 0,005$  мм (а, г), установившегося износа –  $h = 0,20$  мм (д),  $h = 0,30$  мм (б) и разрушения –  $h = 0,40$  мм (в),  $h = 0,60$  мм (е)



Моделирование процесса при различной геометрии режущего клина, с учётом изменения угла заточки и образования фаски на задней поверхности при изнашивании (см. рис. 6) позволило предложить рациональную геометрию инструмента с покрытием TiN, обеспечивающую при контролируемой величине износа по задней поверхности достаточную прочность инструмента.

Таким образом, уменьшение трения, повышение прочности и создание теплового барьера для инструмента с покрытием приводит к перераспределению контактных нагрузок на передней и задней поверхностях режущего лезвия и существенной трансформации напряженного состояния у режущей кромки инструмента. Применение покрытий приводит к уменьшению длины контакта по передней и задней поверхностям и уменьшению сжимающих напряжений. Точка приложения результирующей силы резания и максимум напряжений для инструмента с покрытием удаляются от режущей кромки на передней поверхности, а максимум напряжений на задней поверхности находится ближе к вершине режущего лезвия. В результате допустимый износ для резца с покрытием ниже, чем для резца без покрытия, однако интенсивность износа существенно меньше, что обеспечивает инструменту с покрытием более значительный период стойкости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Ерёмченко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Физические и тепловые процессы в технологических системах. - Мн.: Вышэйшая школа, 1990. - 512 с.
2. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. - М.: Машиностроение, 1986. - 192 с.
3. Прогрессивные методы изготовления металлорежущего инструмента / А.В. Белый, В.Г. Дородейко, Е.М. Макушок, А.А. Миневиц. - Мн.: БелНИИИТИ, 1989. - 56 с.
4. Wear Resistance and Structures of (Ti, Al) N Coatings / A.V. Byeli, A. A. Minevich, A.V. Stepanenko et al. // *Frontiers of tribology: Proc. of the International Conference.* - Stratford-upon-Avon, UK, 1991. - P. 106-107.
5. Обработка износостойких покрытий / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец и др. - Мн.: Дизайн ПРО, 1997. - 208 с.
6. Suh P.N. New Theories of Wear and Their Implications for Tool Materials // *Wear.* - 1980. - Vol. 62, No. 1. - P. 1-20.