

## ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант,  
С.Р. ШЕХТМАН, д-р техн. наук

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р., 2021

В статье проведены аналитические расчеты и установлен характер распределения тепловых потоков в зоне резания при применении износостойких покрытий. Смоделированы теплофизические явления в зоне резания при использовании композиционных износостойких покрытий на режущем инструменте с эффектом самоорганизации при трении. Для подтверждения явления самоорганизации и перераспределения тепловых потоков в контактной зоне проведены серии адгезионных, износостойкостных, температурных и силовых исследований при точении различных марок сталей и сплавов. Повышение износостойкости режущего инструмента с многослойным композиционным покрытием достигается путем перераспределения теплового потока в зоне резания за счет образования защитных экранирующих вторичных структур.

*Ключевые слова:* резание металлов, трение, износ, износостойкие покрытия, термодинамика, трибосистема, самоорганизация, вторичные структуры, теплопроводность, температура резания, износостойкость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-34-43**

### ВВЕДЕНИЕ

Создание и внедрение современных материалов с уникальными физико-механическими свойствами и инновационных конструкций деталей, необходимость управления жизненным циклом изделия (проектирование, производство, эксплуатация и ремонт) при минимизации энерго- и ресурсозатрат определяют совершенствование технологии обработки резанием в направлении интенсификации на основе использования современного высокопроизводительного станочного оборудования [1–3]. Производительность операций резания металлов может быть увеличена за счет увеличения скорости обработки. Ограничивающим фактором при этом является снижение износостойкости режущего инструмента. Поэтому важно понимать, что приводит к разрушению материала инструмента, для того чтобы создать такие условия, при которых данные негативные факторы оказывали бы наименьшее влияние на износ режущего инструмента. Важнейшими из таких факторов являются термическое воздействие на режущий инструмент и тепловой режим в процессе резания [1].

Известно [3–7], что нанесение покрытия на инструментальные материалы позволяет значительно повлиять на контактные процессы в зоне резания. Особенно это характерно для наиболее термодинамически неустойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет

пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, «ювенильных» поверхностей с последующим образованием вторичных структур вследствие интенсивного окисления. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения и перераспределению тепловых потоков.

Согласно второму принципу термодинамики в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Данный процесс соответствует уменьшению энтропии и появлению самоорганизующихся рассеивающихся структур [4–7]. Именно в этом заключается отличие открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Для явления самоорганизации характерен принцип экранирования, состоящий во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Другими словами, существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда это равновесие нарушается, начинается разрушение материала поверхности. Таким образом, эффект экранирования при трении препятствует всем видам непосредственного взаимодействия поверхностей трибопары и разрушению основного металла. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения. Рассеивание энергии во время трения связано с формированием устойчивых рассеивающих структур на контактной поверхности. Этот процесс можно рассматривать как пример использования самоорганизующихся явлений в технике.

В процессе лезвийной обработки резанием практически вся механическая энергия превращается в тепловую. При этом устойчивость инструмента к изнашиванию во многом определяется температурными режимами системы резания. Вместе с тем для пары «инструмент – деталь» существует оптимальная температура резания, которая соответствует минимальному износу инструмента независимо от режимов резания [3]. Это означает, что если в процессе обработки температура резания меньше оптимальной, то необходимо ее увеличить. Если температура резания больше оптимальной, нужно создать условия для ее снижения. Управление температурой резания и поддержание на заданном уровне исключает фактор отрицательного влияния температуры на износ инструмента. Этого можно достичь регулированием тепловых потоков в системе «инструмент – заготовка – стружка – среда» с использованием современных композиционных покрытий, способных адаптироваться к внешним воздействиям. Композиционные многослойные покрытия на режущем инструменте обладают двойными функциями, поскольку могут существенно изменять как поверхностные характеристики материала инструмента (фрикционные свойства, теплопроводность, склонность к физическому и химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и т.д.), так и одновременно влиять на контактные процессы. Таким образом, многофункциональность промежуточной технологической среды, какой является покрытие, позволяет прогнозировать возможность направленного управления температурой резания [3, 6]. С одной стороны, покрытие может существенно снизить коэффициент трения в системе резания металлов и уменьшить мощность фрикционных источников тепла. С другой стороны, оно обладает экранирующей функцией и способно значительно уменьшить интенсивность тепловых потоков в режущем клине инструмента и тем самым повысить температурный порог начала адгезионного взаимодействия в системе «заготовка – инструмент», уменьшая интенсивность диффузии между ними.

Целью данной работы является аналитический расчет тепловых потоков и моделирование теплофизических явлений при резании металлов инструментом с

различными композиционными износостойкими покрытиями, что в целом позволит прогнозировать образование вторичных структур с экранирующим, смазывающим и другими эффектами при определенных температурно-силовых условиях в результате самоорганизации, а также повысить эффективность лезвийной обработки резанием.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Тепловые процессы при резании металлов являются своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента [7, 8]. При наличии на контактных площадках инструмента износостойких покрытий снижаются работа деформации и силы резания. Это свидетельствует об уменьшении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям. Износостойкие покрытия, отличаясь по своим теплофизическим свойствам от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, могут также изменять или регулировать направление и интенсивность тепловых потоков: в сторону инструмента, детали и стружки, а также в окружающую среду. Очевидно, что в этом случае снижение интенсивности основных источников теплоты и изменение направления тепловых потоков приведет к изменению теплового состояния инструмента и температуры резания. Использование известных методик теоретического анализа теплового и напряженного состояний материала режущего клина, где его тонкие слои характеризуются большим градиентом теплопроводности, затруднительно в связи со значительным объемом вычислений. Разработанная методика основана на принципиально новом подходе к решению задачи теплопереноса на базе сведения задачи с переменными коэффициентами к последовательному решению уравнений с постоянными коэффициентами.

При разработке методики были приняты следующие допущения:

теплопроводность, удельная теплоемкость инструментального и обрабатываемого материалов не зависят от температуры;

источники теплообразования распределены в контактных поверхностях и в плоскости скалывания;

плоскость скалывания расположена перпендикулярно к передней поверхности резца;

теплообмен с окружающей средой отсутствует;

коэффициенты трения, силы резания, коэффициент усадки стружки, длины контактных поверхностей для режущих инструментов с покрытием и без покрытия одинаковы;

скорость движения элементов материала стружки одинакова по ее толщине.

Интенсивности тепловыделения приняты по работе [1]. При анализе зона резания разделена на три прямоугольные области (рис. 1):  $T$  – инструмент,  $S$  – стружка,  $D$  – деталь;  $T_1$  и  $T_2$  – однородная и неоднородная части инструмента, содержащие покрытие. В зонах  $T$ ,  $S$  и  $D$  задача теплопроводности решается отдельно. При этом через контактные поверхности происходит теплообмен по закону Стефана – Больцмана [1–3]. Так как размеры рассматриваемой зоны резания очень малы, причем время стабилизации температуры в этой зоне тоже невелико, то влияние естественных границ тел проявиться не успевают (за исключением внешней стороны стружки). Поэтому зону  $S$  можно считать неограниченной в направлении оси  $O_x$ , зону  $D$  – в направлениях  $O_z$ ,  $O_y$  и  $O_2$ , зону  $I$  – в направлениях  $O$  и  $O_2$ .

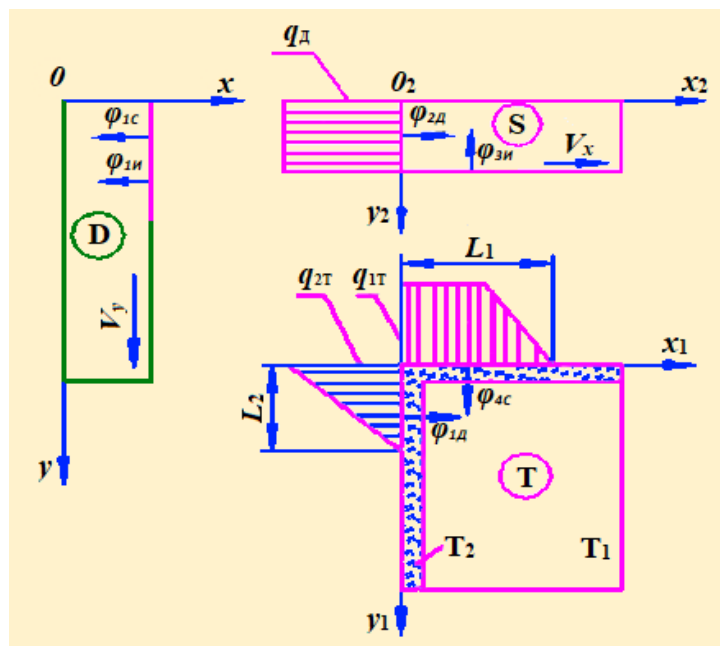


Рис. 1. Расчетная схема тепловых полей в зоне резания:  $L_1, L_2$  – длина контактов по передним и задним площадкам;  $q_{1T}, q_{2T}, q_d$  – интенсивности тепловыделения

На основании разработанного алгоритма составлена компьютерная программа. Расчеты выводятся на печать в матричной форме для зоны резания в целом и отдельно для режущего клина в зависимости от времени вплоть до стабилизации теплового поля. Построением изотерм непосредственно на распечатках получаем температурное поле в зоне резания.

Расчеты выполнялись при условиях:

обрабатываемый материал – сталь 40Х с пределом прочности  $\sigma_B = 500$  МПа, температуропроводностью  $a_1 = 670$  м<sup>2</sup>/с, удельной теплоемкостью  $cp = 5,03 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);

режущий инструмент ТТ8К6 с температуропроводностью основы  $a_2 = 300$  м<sup>2</sup>/с, насыщенного слоя  $a_3 = 1500 \dots 300$  м<sup>2</sup>/с (меняющейся по глубине, определена линейной интерполяцией согласно концентрационных кривых), удельной теплоемкостью  $cp = 2,51 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);

режимы резания: скорость  $v = 450$  м/мин, подача  $s = 0,11$  мм/об, глубина  $t = 0,5$  мм.

Использовано износостойкое покрытие TiN толщиной 5 мкм.

По результатам расчетных данных получены температурные поля в режущем клине и контактных поверхностях (рис. 2), анализ которых показал, что при применении композиционных износостойких покрытий максимальная температура резания уменьшается на 16...31 %, расстояние между изотермами возрастает в 1,5...1,7 раза, что в свою очередь приводит к снижению градиента температур и термонапряжений. Как известно [9–11], с уменьшением темпа роста контактных температур в момент врезания  $\Delta\theta/\Delta t$  увеличивается динамическая прочность рабочей части инструмента, что очень важно при обработке со значительными колебаниями сил резания.

Качественным подтверждением теоретических исследований являются изотермы цветовых переходов. Некоторое отклонение экспериментальных и расчетных значений температур связано, во-первых, с увеличением фактической площадки контакта по мере износа инструмента, а во-вторых, с отдельными допущениями теоретической методики. Необходимо отметить, что незначительные отклонения результатов

расчета и эксперимента подтверждают правомерность принятых допущений и верность разработанной методики в целом.

Анализ полученных алгоритмов и результатов проведенных расчетов выявил ряд существенных недостатков, в частности:

«идеализированность» модели и, как следствие, сложность учета всех факторов, влияющих на теплонапряженность зоны резания в реальных производственных условиях;

длительность и динамичность контактных процессов по времени при лезвийной обработке резанием;

многовариантность полученных данных при изменении нескольких параметров процесса резания и т.д.

Положительным моментом таких расчетов является возможность теоретической оценки распределения тепловых потоков и качественной оценки влияния основных параметров процесса резания на теплонапряженность контактной зоны.

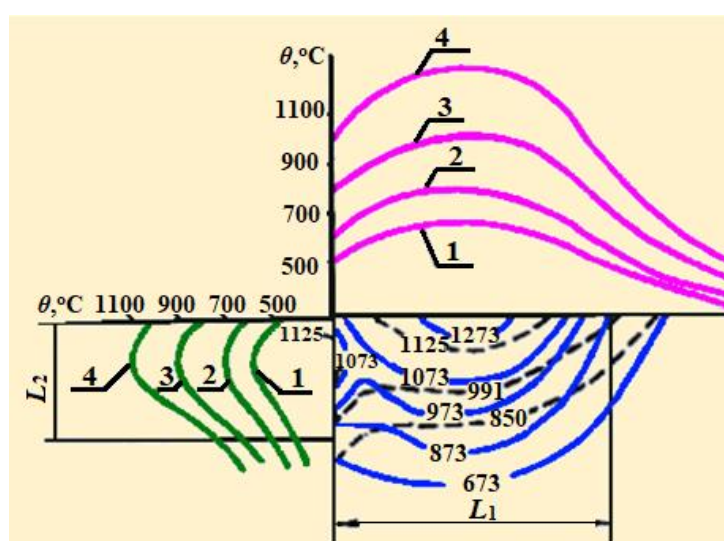


Рис. 2. Температурное поле в режущем клине и распределение температур на контактных поверхностях инструмента ТТ8К6 с покрытием TiN при точении при  $\tau$ , равном: 1 – 60 с; 2 – 120 с; 3 – 240 с; 4 – 960 с;  
——— – расчетные изотермы; - - - - - – экспериментальные изотермы

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СРЕДЕ DEFORM 3D

Моделирование процесса резания может существенно сократить сроки разработки технологии в связи с подготовкой производства, особенно при использовании инновационных инструментальных материалов и покрытий. Существует потребность в математических моделях, которые достоверно описывают термомеханические явления, сопровождающие процесс резания, и позволяют прогнозировать свойства материалов при резании, а также износостойкость и другие эксплуатационные характеристики режущего инструмента и разработанных композиционных многослойных покрытий уже на стадии технологической подготовки производства. Для моделирования процесса резания использовалась программная среда DeForm-3D. При этом принята следующая условность: при продольном точении движения сообщаются твердому телу, имитирующему режущий инструмент, а к заготовке прикладываются только силы, поэтому инструмент перемещается относительно заготовки (рис. 3). На основе предварительно проведенных натурных экспериментов при продольном точении были определены

основные параметры резания: режимы обработки, марка, геометрия инструмента и размеры заготовки, параметры инструментальных покрытий и т.д. В качестве заготовки использовался цилиндрический вал диаметром 120 мм и длиной 600 мм из сталей и сплавов: 40Х; 12Х18Н10Т; ХН73МБТЮ и др. Режимы резания соответствовали следующим параметрам:

частота вращения шпинделя 1 600 об/мин,  
скорость подачи 0,11 мм/об,  
глубина резания 0,5 мм.

В качестве инструментального материала использовались твердосплавные четырехгранные пластины и фрезы групп ВК, ТК и ТТК.

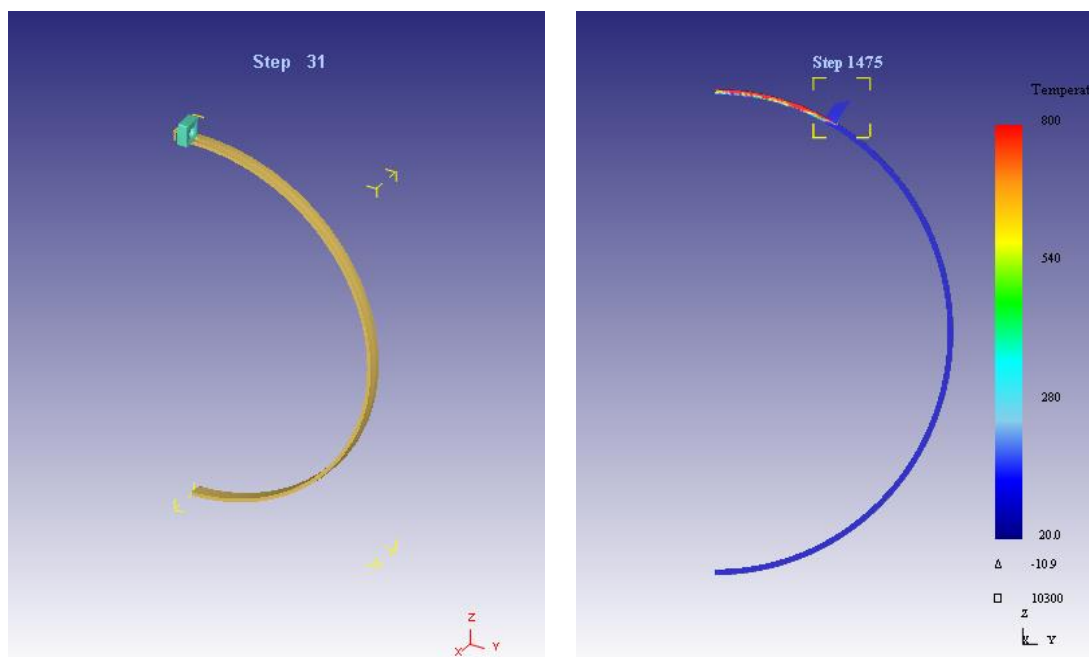


Рис. 3. Условная схема резания при моделировании

Применение компьютерного моделирования позволяет варьировать теплофизические параметры и трибологические свойства зоны контакта, моделируя характеристики износостойких покрытий на границе «инструмент – деталь». Таким параметром может быть не только теплопроводность покрытия, но и начальные условия контактной зоны (например, коэффициент трения, наличие смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) и т.д.), которые в свою очередь влияют на формирование источников тепла и их интенсивность. На рис. 4 показаны результаты расчетов в программе «DeForm 3D» при использовании различных композиционных износостойких покрытий, как по химическому составу, так и по толщине слоя. Представленные результаты наглядно и информативно показывают явление перераспределения теплового потока в зоне резания при использовании различных износостойких покрытий. На рис. 4 в качестве примера показана тепловая нагруженность режущего клина с различными покрытиями при одинаковом времени работы (для всех шаг 800). Так, на рис. 4(а), (б) видно при резании инструментом без покрытия и с покрытием *TiN* существенную тепловую нагруженность самого режущего клина и по задней поверхности. При этом из-за высокой температуры в зоне резания и адгезионного схватывания единичного пятна контакта будет интенсифицироваться радиальный износ режущего клина, определяющий размеры обрабатываемой детали и

показатели качества поверхностного слоя. Вместе с тем при использовании других покрытий (рис. 4(в)–(е)) происходит пере-распределение (переход) теплового потока с задней на переднюю поверхность инструмента, т.е. большая часть тепла уходит в стружку, что более благоприятно с точки зрения адгезии и уменьшения размерного износа [10].

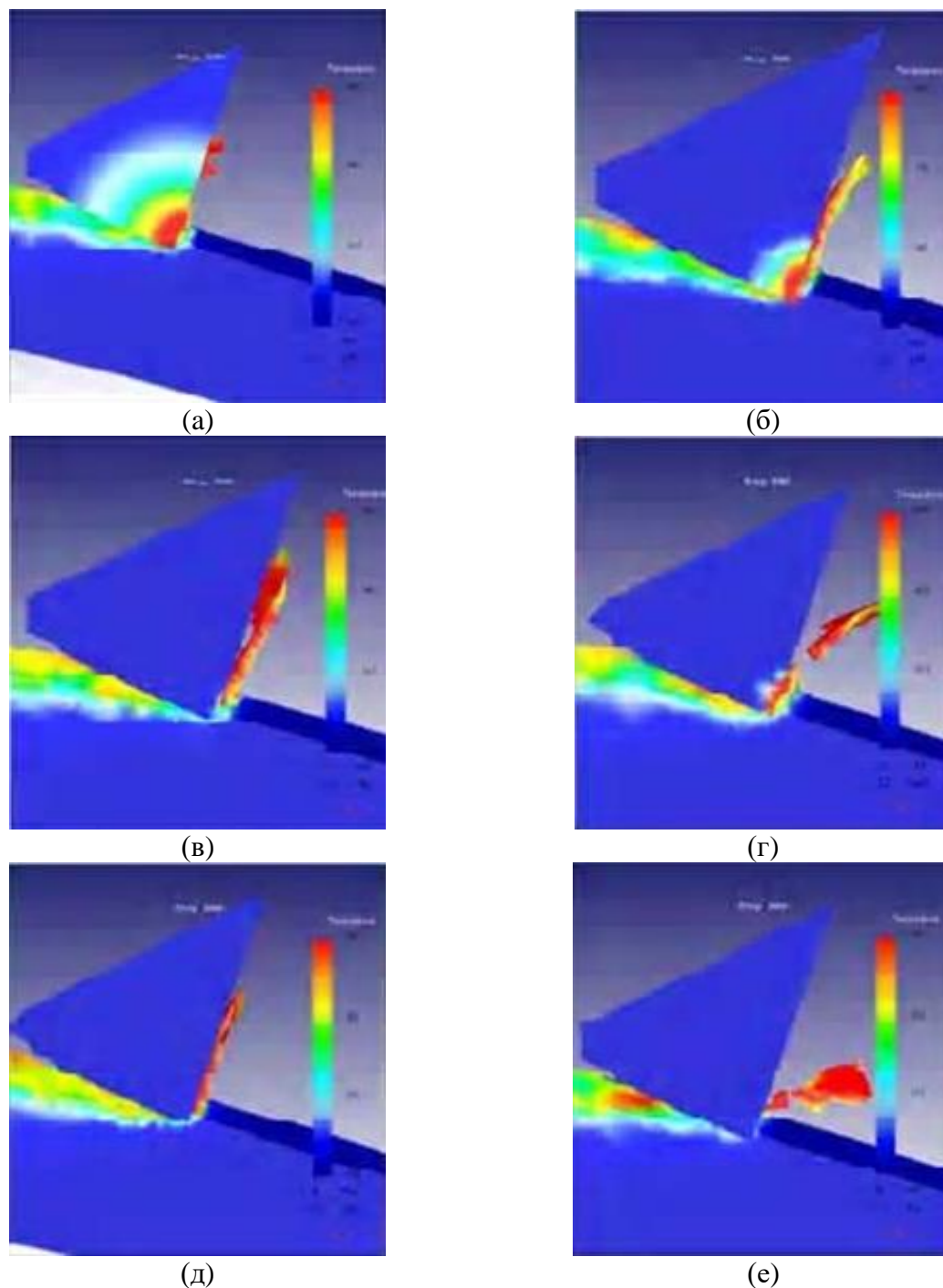


Рис. 4. Расчет температурных полей в среде Deform 3D: без покрытия (а); TiN толщиной 5 мкм (б); TiCN толщиной 5 мкм (в); слой TiN толщиной 5 мкм и слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм (г); слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм и слой TiCN толщиной 5 мкм (д); слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 5 мкм и слой TiN толщиной 5 мкм (е)

Проводилось моделирование при различных коэффициентах теплопроводности износостойкого покрытия и образовавшихся на поверхности инструмента вторичных структур. В целом сравнительный анализ результатов расчета значений температур по тепловым потокам (см. рис. 2), по моделированию (см. рис. 3, 4) и данных натуральных экспериментов показал, что расхождение составляет 4...9 % и является достаточно объективной оценкой температурного поля в зоне резания; моделирование в данной среде позволяет наряду с теплофизическими параметрами дополнительно учитывать технологические (скорость резания, наличие покрытия или СОТС, а также износа режущего инструмента) и их влияние на распределение тепловых потоков, что имеет большое значение при использовании этой методики в условиях реального машиностроительного производства.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ**

Для подтверждения теоретических зависимостей и гипотез были проведены триботехнические испытания и серии экспериментальных исследований влияния на износостойкость, температуру и усилие резания при точении и фрезеровании инструментальными материалами групп ВК, ТК и ТТК с многослойными покрытиями (TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N различных обрабатываемых материалов в широком диапазоне изменения элементов режима резания.

Путем экспериментальных исследований установлено:

1) результаты натуральных экспериментальных исследований при точении и компьютерного моделирования теплофизических явлений при изменении температуры резания сопоставимы;

2) применение многослойных покрытий для металлорежущего инструмента позволяет существенно увеличить его износостойкость и период стойкости и, как следствие, повысить эффективность всего процесса при снижении температурно-силовой напряженности зоны резания за счет снижения прочности на срез адгезионных связей практически во всем исследованном диапазоне температур контакта; смещения (исключения) зоны прирабочного износа; проявления эффекта перераспределения теплового потока и запаздывания тепловых явлений в зоне пластической деформации. Износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями при точении, в сравнении с основой в исследуемом диапазоне режимов обработки, увеличилась в среднем в 2...2,5 раза.

Лучшие показатели эксплуатационных свойств многослойных покрытий характерны для (TiAl)N, (AlTi)N, (AlTiCr)N, причем с ростом подачи увеличивается вероятность хрупкого разрушения покрытия. При скоростях активного наростообразования разница в стойкости инструмента с покрытием и без покрытия предельно уменьшается. Покрытие принципиально не изменяет механизмы изнашивания твердых сплавов, сдвигая их в область более высоких скоростей резания за счет снижения уровня термомеханической напряженности в зоне резания.

Работоспособность покрытия резко возрастает при скоростях резания более 150 м/мин, когда оно повышает сопротивляемость твердосплавной матрицы диффузионному растворению в обрабатываемом материале и способствует смещению уровня оптимальных скоростей резания в сторону их увеличения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.



2. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Вышэйш. шк., 1990. 512 с.
3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
4. Исаев С.И. Термодинамика: учеб. для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 412 с.
5. Кабалдин Ю.Г., Семибратова М.В., Кириченко В.В. Самоорганизация в процессах трения при резании // *Известия Томского политехнического университета*. 2002. Т. 305. № 1. С. 95–100.
6. Постнов В.В. Термодинамическое описание синхронизма механических и тепловых процессов при нестационарном резании металлов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2009. Т. 12. № 4. С. 5–10.
7. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
8. Артамонов Е.В. О взаимосвязи внутренних напряжений в инструментальных твердых сплавах с работоспособностью сборных инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. 161 с.
9. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Садыков А.Ф., Хусаенов И.И. Моделирование теплофизических явлений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 13–21.
10. Григорьев С.Н., Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Сеиткулов А.Р. Термодинамическая модель интенсивности износа режущего инструмента с покрытиями. Моделирование нелинейных процессов и систем: материалы Пятой Международной конференции. М.: Янус-К, 2021. С. 155–163.
11. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрyтия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 326 с.

**Для цитирования:** Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 34–43.

## **CUTTING TEMPERATURE WHEN USING A MULTI-COATED TOOL**

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate  
S.R. SHEKHTMAN, Dr. Sc.

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,  
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

In the work, analytical calculations are carried out and the nature of the distribution of heat fluxes in the cutting zone when using wear-resistant coatings is established. Thermophysical phenomena in the cutting zone are modeled when using composite wear-resistant coatings on a cutting tool with the effect of self-organization under friction conditions. To confirm the phenomenon of self-organization and redistribution of heat fluxes in the contact zone, a series of adhesive, wear-resistant, temperature and force studies were

carried out when turning various grades of steels and alloys. An increase in the wear resistance of a cutting tool with a multilayer composite coating is established by redistributing the heat flux in the cutting zone due to the formation of protective shielding secondary structures.

*Keywords:* metal cutting, friction, wear, wear-resistant coatings, thermodynamics, tribosystem, self-organization, secondary structures, thermal conductivity, cutting temperature, wear resistance.

## REFERENCES

1. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 288 p.
2. Yashcheritsyn P.I., Yeremenko M.L., Feldshteyn Ye.E. *Teoriya rezaniya. Fizicheskiye i teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Cutting theory. Physical and thermal processes in technological systems]. Minsk: Vysheysh. shk., 1990. 512 p.
3. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p.
4. Isaev S.I. *Termodinamika: uchebnik* [Thermodynamics: textbook]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 412 p.
5. Kabaldin Yu.G., Semibratova M.V., Kirichenko V.V. Self-organization in cutting friction processes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2002. V. 305. No 1, pp. 95–100. (In Russian).
6. Postnov V.V. Thermodynamic description of synchronism of mechanical and thermal processes in non-stationary cutting of metals. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. V. 12. No 4, pp. 5–10. (In Russian).
7. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Cutting materials. Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 448 p.
8. Artamonov E.V. *O vzaimosvyazi vnutrennikh napryazheniy v instrumentalnykh tverdykh splavakh s rabotosposobnostyu sbornykh instrumentov* [On the relationship of internal stresses in tool hard alloys with the performance of prefabricated tools]. Tyumen: TyumGNGU, 2014. 161 p.
9. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Sadykov A.F., Khusaenov I.I. Modeling of thermophysical phenomena. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2020. No 3 (7), pp. 13–21. (In Russian).
10. Grigoriev S.N., Migranov M.Sh., Migranov A.M., Seitkulov A.R. Thermodynamic model of the wear rate of a coated cutting tool. Modeling of nonlinear processes and systems. *Materials of the V international conference*. Moscow: Janus-K. 2021, pp. 155–163. (In Russian).
11. Krioni N.K., Migranov M.Sh. *Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy* [Coatings and greases for high temperature tribo conjugation]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 326 p.

Поступила в редакцию/received: 01.06.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021