

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

А.М. МИГРАНОВ, М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,
А.Ф. САДЫКОВ, И.И. ХУСАЕВ

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

© Мигранов А.М., Мигранов М.Ш.,
Садыков А.Ф., Хусаев И.И., 2020

Представлены результаты компьютерного моделирования теплофизических явлений в контактной зоне при лезвийной обработке резанием металлов инструментом с многослойными композиционными износостойкими покрытиями, обеспечивающими приспособляемость режущего клина к условиям трения. Проведены натурные экспериментальные исследования температуры резания при точении с различными покрытиями, структурно-фазовый анализ поверхностного слоя режущего инструмента для объяснения механизма формирования вторичных структур, обладающих экранирующим эффектом – эффектом самоорганизации.

Ключевые слова: износ, трибосистема, активация, пассивация, вторичные структуры, самоорганизация, теплофизические явления, износостойкие покрытия, экранирующий эффект.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-13-22

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность автоматизации технологических процессов и использования современного дорогостоящего высокопроизводительного станочного оборудования, оснащенного мехатронными системами, требует более полного изучения особенностей температурно-силовых условий лезвийной обработки резанием металлов, так как с точки зрения износостойкости наиболее слабым звеном является режущий инструмент [1–3]. В настоящее время накоплен значительный опыт и имеется множество теоретико-экспериментальных исследований по повышению эксплуатационных характеристик режущего инструмента путем использования современных многослойных композиционных износостойких покрытий, обладающих способностью приспособляться к условиям трения при резании благодаря образованию защитных вторичных структур.

Известно [4–8], что обработка резанием – термодинамический процесс, при котором тепловые явления в контактной зоне оказывают существенное влияние как на состояние режущего клина в целом, так и на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя инструмента с покрытием вследствие активации и пассивации энергии. Изменение внутренней энергии трибосистемы в дальнейшем приводит к взаимодействию активированных поверхностей с окружающей средой и образованию защитных структур, служащих «экраном» между контактирующими материалами. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения вследствие самоорганизации. Значение применения этого явления в технике и технологии сложно переоценить. Во время трения и износа самоорганизация материалов трибосистемы происходит как реакция на внешние условия, вызываемые процессом резания, что, во многих случаях, приводит к коренным структурным

изменениям в поверхностных слоях материалов. Эти изменения касаются многих характерных свойств трущихся поверхностей и близлежащих поверхностных слоев (например, геометрических параметров, микроструктуры, физико-химических и механических свойств).

Трение всегда сопровождает износ; оно является единственной «нормальной» причиной износа и потери инструментом режущих свойств, общие закономерности трения и износа взаимодействующей пары материалов инструмента и обрабатываемой детали составляют практическую основу при определении и назначении режимов резания. Трение возникает непосредственно в процессе резания и воздействует на явления резания, однако само зависит от элементов режима резания, создающих специфические условия для протекания трения. К этим условиям можно отнести высокие давления (пластическую деформацию) в зоне трения, широкий диапазон температур, наличие третьих тел (защитных вторичных структур) на трущихся поверхностях и т. д. На основе вышеизложенного можно предположить существование «идеальной» с точки зрения температурно-силовых условий резания и износостойкости режущего инструмента модели режущего клина, имеющего вид слоеного пирога (композита) (рис. 1). Эта модель сформирована комплексным (комбинированным) воздействием на поверхностный слой в результате самоорганизации. При этом каждый слой «пирога» (нанесение износостойких и демпфирующих покрытий (слои 1 и 2), имплантация различных металлов и неметаллов (слой 3) и использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в качестве катализатора) ответствен за определенную зону кривой износа и улучшает износостойкость инструмента в целом.

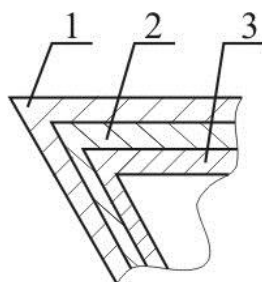


Рис.1. Модель режущего клина

Целью работы является моделирование теплофизических процессов и явлений самоорганизации при лезвийной обработке резанием инструментом с композиционными покрытиями, обеспечивающими минимизацию интенсивности износа режущего инструмента при различных температурно-силовых условиях в контактной зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были проведены серии натурных экспериментов при продольном точении и фрезеровании по исследованию триботехнических характеристик и износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями по составу и атомной структуре поверхностного слоя материала. Вместе с тем анализ литературных данных показал, что при наличии многочисленных трудов [см., например, 2–5] по исследованию контактных процессов при работе с режущим инструментом, покрытым многослойным композиционным износостойким покрытием, отсутствует информация о влиянии применения СОТС и самих покрытий, обладающих эффектом самоорганизации при трении. Известно [1, 4–7], что при трении на контактирующих поверхностях образуются защитные вторичные структуры, которые могут иметь

существенное значение для перераспределения тепловых потоков в зоне резания, что позволило бы управлять температурно-силовыми условиями при резании путем варьирования физико-механическими и теплофизическими параметрами сред и покрытий. Вышеизложенную задачу можно смоделировать благодаря наличию в настоящее время большого числа прикладных программных продуктов для персональной электронно-вычислительной машины. Применение этих продуктов существенно уменьшает трудоемкость, стоимость натуральных экспериментов и увеличивает количество вариантов решений.

При контакте «инструмент – деталь» тепловой поток из зоны резания распределяется между обрабатываемой деталью, режущим инструментом, сходящей стружкой и окружающей средой [2]. Вместе с тем при направленном изменении физико-механических, структурных и теплохимических свойств СОТС и многокомпонентных композиционных покрытий можно оказать существенное воздействие на направление и в целом на распределение теплового потока. При увеличении теплового потока, передаваемого в стружку (в условиях высокоскоростной обработки), уменьшается тепловая нагруженность режущего клина инструмента с последующим изменением адгезионного и диффузионного износа. Отбор тепла (рекупирация) в зоне резания при низких скоростях обработки обеспечивает смазочный эффект за счет образования рутилы из покрытий и приводит к уменьшению абразивного износа.

На основе работ [2, 6] для решения уравнения теплопроводности и теплофизических параметров применительно к инструменту с покрытием были составлены системы дифференциальных уравнений для каждого из источников и затем разработана программа для их расчетов, проведены расчеты температурных полей в зоне резания. Результаты расчетов и анализ полученных многовариантных данных показал, что, во-первых, всегда необходимо учитывать переменность основных составляющих уравнения, во-вторых, невозможно их систематизировать, в-третьих, нельзя дать наглядную оценку температурного поля в зоне резания, позволяющую регулировать режимы резания.

В настоящее время для решения сложных дифференциальных задач с несколькими переменными и оценивания направленности и количества теплового потока все чаще применяются в инженерных и исследовательских работах, содержащих теплофизический анализ, пакеты программ DEFORM, ANSYS и др. Это позволяет не только моделировать, но и наглядно демонстрировать направление теплового потока при различных скоростях резания, проиллюстрировать контактные процессы в зоне резания при различных теплофизических свойствах многослойных износостойких покрытий и переменности технологических параметров.

В работе были проведены серии натуральных испытаний по определению триботехнических характеристик твердосплавных режущих инструментов групп ВК, ТК и ТТК с различными покрытиями ((TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N), а также по установлению температуры резания методом естественной термопары при точении конструкционной стали марки 40Х с твердостью 20 HRC на токарно-винторезном станке 16К20 неперетачиваемыми пластинами со всеми вышеперечисленными покрытиями. При этом были проведены предварительные экспериментальные исследования и сравнительный анализ данных математической модели с реальными значениями температуры резания и износостойкости режущего инструмента, нанесенных различными фирмами («Бальцерс», Caromant, Carbide, Rimet) по заводским технологиям.

Триботехнические свойства были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [9]. На адгезиомере (рис. 2) вращающийся индентор с исследуемыми

покрытиями 2 был помещен между двумя полированными образцами 1, изготовленными из обрабатываемого материала. Для моделирования условий трения, аналогичных процессу резания, образцы и индентор нагревались электроконтактным способом в диапазоне температур от 150 до 1 050 °С. Для создания пластической деформации в зоне контакта, аналогичной процессу резания, образцы из обрабатываемого материала 1 сжимались силой, равной 2 400 Н. При этом для оценки антифрикционных свойств слоя был использован адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент важен для анализа и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов. Он определялся как отношение сопротивления сдвигу τ_{mn} , вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению P_m , возникающему на пластическом контакте при температурах испытания (τ_{mn}/P_m).

В работе для получения сведений о средней температуре контакта при резании с достаточно высокой точностью, простотой и надежностью был использован, согласно рекомендациям [2], метод естественной термопары. Ее принципиальная схема для операций точения представлена на рис. 3. Модель установки включает в себя также диск 4 с тянущим тросиком 3, электроконтактные клеммы 5 с изоляторами 6.

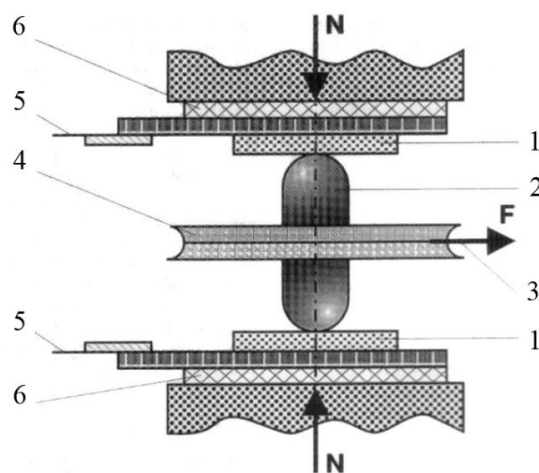


Рис. 2. Модель установки для исследования триботехнических свойств

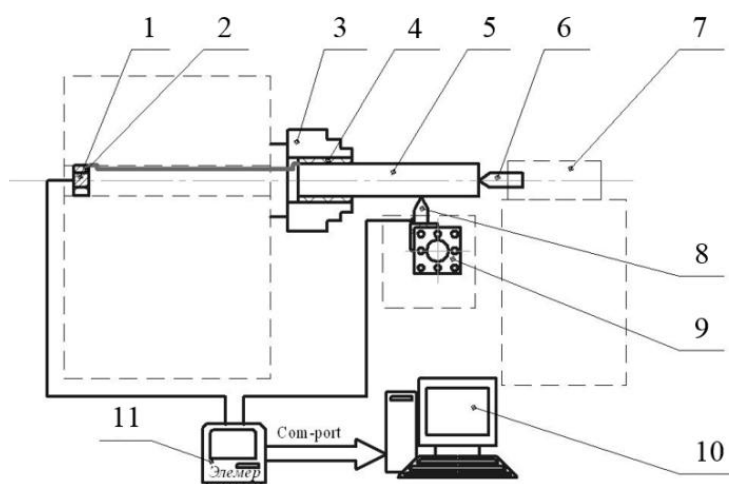


Рис. 3. Схема измерения температуры методом естественной термопары

Схема состоит из ртутного токосъемника 1, изоляции 2, 4, патрона 3, заготовки 5, изолированного заднего центра 6, задней бабки 7, резцедержателя 8, резца с изоляцией 9, компьютера 10, цифрового вольтметра 11 (см. рис. 3). Для исключения погрешностей измерения от «блуждающих паразитных» термоэлектродвижущих сил деталь и резец изолировались друг от друга текстолитовыми прокладками.

Результаты температурных экспериментов при точении режущим инструментом с различными покрытиями представлены на рис. 4. Было установлено, что с точки зрения температуры (тепловой нагруженности) зоны резания при минимизации интенсивности износа режущего инструмента наиболее благоприятной является многослойное композиционное покрытие (TiAl)N фирмы Rimet.

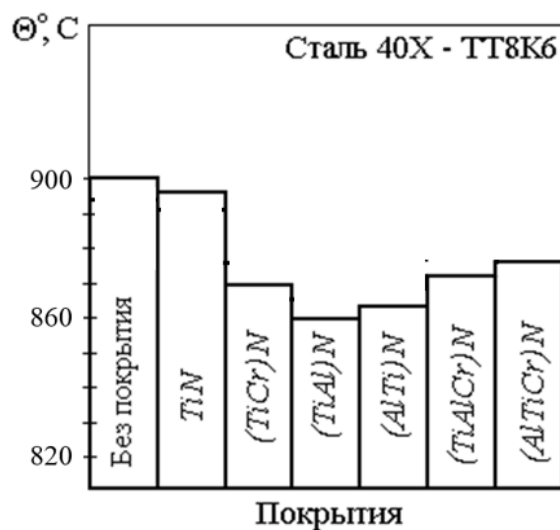


Рис. 4. Влияние типа покрытия на температуру Θ в зоне резания при продольном точении

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При разработке методики и моделировании 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 передней поверхности резца; теплообмен с окружающей средой отсутствует; коэффициенты трения, силы резания, усадки стружки, длины контактных поверхностей для режущих инструментов с различными покрытиями являются переменными; скорость движения элементов материала стружки одинакова по ее толщине. Величины интенсивности тепловыделения были взяты из работ профессора А.Н. Резникова. Для идентичности экспериментальных данных и результатов моделирования обеспечивалось постоянство оптимальной скорости резания по интенсивности износа режущего инструмента при переменности коэффициента теплопроводности и физико-химического состава покрытий. На рис. 5 показаны результаты расчетов (программный пакет – ANSYS) при различных коэффициентах теплопроводности материала детали, инструмента и покрытия.

По результатам натурных экспериментальных исследований и моделирования было установлено, что в непосредственном контакте с деталью находится материал покрытия, коэффициент теплопроводности которого меняется в зависимости от типа покрытия. Так, на рис. 5а коэффициент теплопроводности покрытия $\lambda = 0,25$, на рис. 5б

$\lambda = 0,15$. При этом температура в стружке повышается по мере того, как меняется коэффициент теплопроводности покрытия при одной и той же температуре контакта, т. е. большая часть теплоты из зоны резания перемещается в стружку. Таким образом, меняя теплофизические свойства поверхностей трения, толщину и структурный состав покрытий для режущего инструмента, можно прогнозировать и управлять тепловым режимом, обеспечивать минимизацию интенсивности износа режущего инструмента при резании металлов.

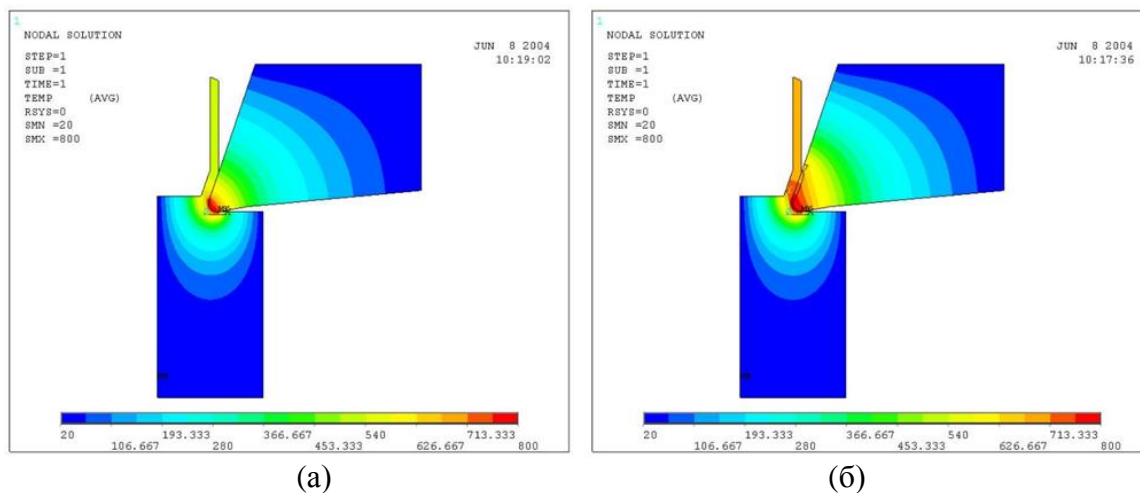


Рис. 5. Расчет температурных полей в среде ANSYS: $\lambda = 0,25$ (а); $\lambda = 0,15$ (б)

С точки зрения наглядности и информативности интересные результаты были получены при использовании пакета программ DEFORM (рис. 6). В частности, можно видеть, что на начальном этапе резания инструментом с многослойным покрытием (рис. 6а) и без покрытия (рис. 6б) основная часть тепла сосредоточена по задней поверхности режущего клина. При этом из-за высокой температуры в зоне резания и адгезионных явлений будет интенсифицироваться радиальный износ режущего клина, обуславливающий размеры обрабатываемой детали и показатели качества поверхностного слоя. Вместе с тем по прошествии некоторого времени происходит перераспределение (переход) теплового потока с задней на переднюю поверхность инструмента (рис. 6в), т. е. большая часть тепла уходит в стружку, что более благоприятно с точки зрения адгезии и уменьшения размерного износа [2, 3]. Моделирование в среде DEFORM позволяет, кроме теплофизических параметров, учитывать дополнительно технологические – скорость резания, наличие покрытия или СОТС, а также износа режущего инструмента и их влияние на распределение тепловых потоков, что имеет важное значение при использовании этой методики в условиях реального машиностроительного производства.

Сравнительный анализ результатов расчета значений температур по математическим моделям и данным натурных экспериментов показал, что расхождение составляет 3...6 % и является достаточно объективной оценкой температурного поля в зоне резания [6]. На основе теоретико-экспериментальных исследований предложены рекомендации по температурному режиму для обеспечения минимизации интенсивности износа режущего инструмента с различными покрытиями.

Для объяснения механизма изменения температурного режима и теплового потока в контактной зоне были проведены дополнительные исследования поверхностей режущего инструмента с покрытиями после обработки резанием [7, 8]. Чтобы понять физический механизм явлений, которые имеют место на поверхности «режущий

инструмент – обрабатываемая деталь», исследовались химический и фазовый составы поверхностных слоев с помощью современных методик и оборудования для анализа состава поверхности покрытия и наружной поверхности пленок, образующихся на кромке режущего инструмента, а также для анализа контактирующей поверхности стружки. Результаты спектроскопических исследований позволили установить, что при высокоскоростном резании на поверхности режущего инструмента с покрытиями образуются оксиды титана, так называемые рутилы, и оксиды алюминия с аморфноподобной структурой. Известно [1, 4, 7], что рутилы работают как смазочный материал, а аморфноподобные структуры обладают экранирующим (для теплового потока) и защитным (износостойким) эффектами.

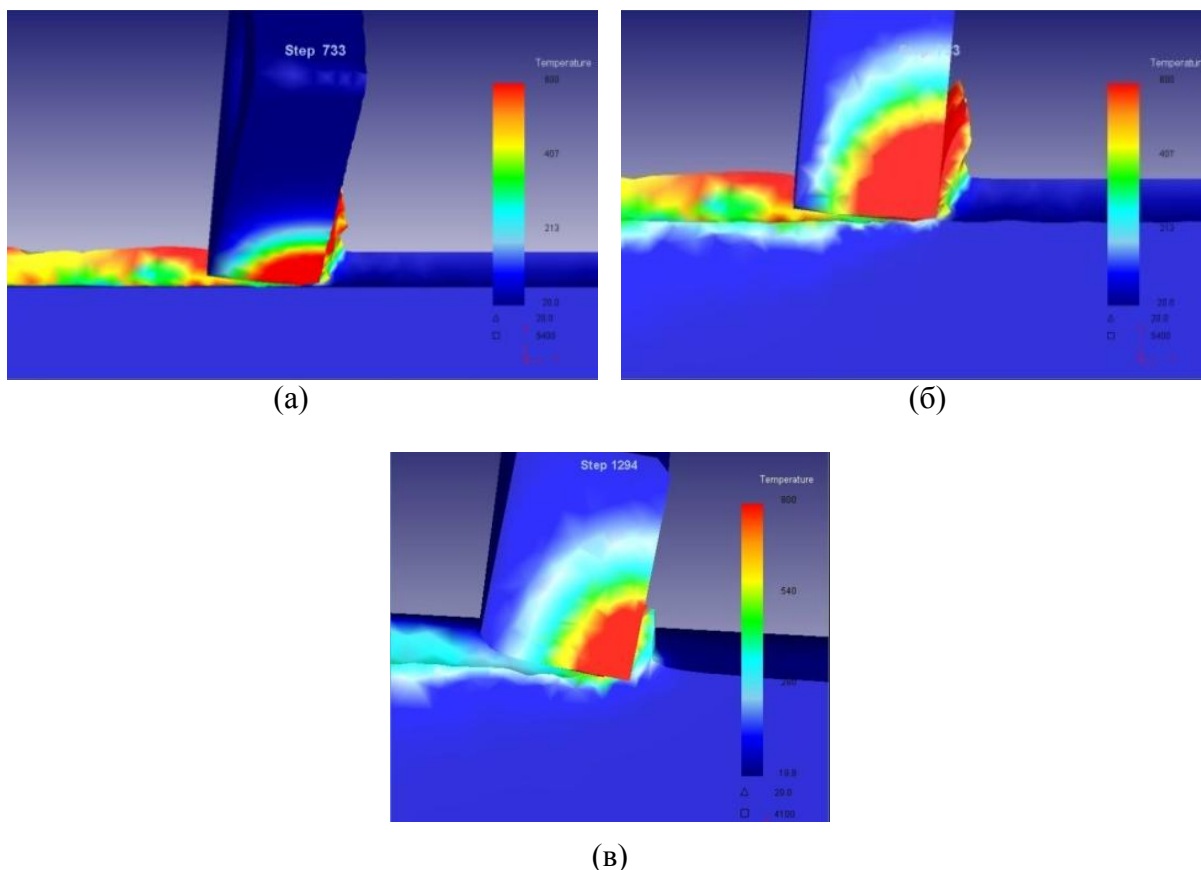


Рис. 6. Результаты расчетов температурных полей в зоне контакта режущего инструмента при скорости резания $V = 450$ м/мин: с покрытием на начальном этапе резания (а); без покрытия на начальном этапе резания (б); с покрытием по прошествии 5 мин от начала резания (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты натуральных экспериментальных исследований при тчении и компьютерного моделирования теплофизических явлений при изменении температуры резания сопоставимы. В широком диапазоне изменения элементов режима резания при тчении режущим инструментом с износостойкими покрытиями для предварительных расчетов и разработки перспективных многослойных композиционных покрытий с эффектом самоорганизации можно использовать программные продукты DEFORM и ANSYS, которые подтверждают адекватность модели.

Высокоскоростная обработка резанием приводит к трибоокислению многослойных композиционных покрытий, которое является важным и благоприятным

процессом для самоорганизации и формирования кислородосодержащих соединений на металлической основе. Они могут действовать как экран и защищают поверхность инструмента, в целом повышают износостойкость. При этом эффект самоорганизации дает возможность создать покрытия, обеспечивающие благоприятный температурный режим в контактной зоне при резании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 1. С. 12.
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. 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.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiya Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. №. 1-2. P. 214–220.
5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 377 с.
6. Мигранов М.Ш., Ахмаров Р.Г., Мигранов А.М. Распределение температурных полей в зоне резания // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2018. С. 83–86.
7. Migranov M.Sh., Migranov R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496. P. 75–79.
8. Vereschaka A.S., Migranov M.Sh., Vereschaka A.A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. № 20. P. 9282–9286.
9. Патент РФ 34249 на полезную модель. *Прибор для исследования адгезионного взаимодействия* / Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш. Заявл. 24.06.2003. Оpubл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

Для цитирования: 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.

MODELING OF THERMOPHYSICAL PHENOMENA

A.M. MIGRANOV, M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc.,
A.F. SADYKOV, I.I. KHUSAENOV

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

The results of the computer modeling of thermophysical phenomena in the contact zone during blade cutting of metals with multi-layer composite wear-resistant coatings are presented. These results ensure the adaptability of the cutting wedge to friction conditions.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (7), 2020*

In-situ experimental studies of the cutting temperature during turning with various coatings and structural-phase analysis of the surface layer of the cutting tool were carried out to explain the mechanism of formation of secondary structures with a shielding effect - the self-organization effect.

Keywords: wear, tribosystem, activation, passivation, secondary structures, self-organization, thermal phenomena, wear-resistant coatings, shielding effect.

REFERENCES

1. Polzer G., Ebeling V., and Firkowski. External friction of solids, dissipative structures and self-organization. *Friction and wear*. 1988. V. 9, No. 1, pp. 12. (In Russian).
2. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p.
3. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. Rezanije materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii [Cutting materials. Thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2001. 448 p.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1-2, pp. 214–220.
5. Krioni N.K., Migranov M.Sh. Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy [Coatings for high-temperature and lubrication of tribo-couplings]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 377 p.
6. Migranov M.Sh., Akhmarov R.G., Migranov A.M. Distribution of temperature fields in the cutting zone. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*, 2018, pp. 83–86. (In Russian).
7. Migranov M.Sh., Migranova R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions. *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496, pp. 75–79.
8. Vereschaka A.S., Migranov M.Sh., Vereschaka A.A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. No. 20, pp. 9282–9286.
9. Patent RF 34249 for utility model. *Pribor dlya issledovaniya adgezionnogo vzaimodeystviya* [Device for the study of adhesive interaction] / Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. Declared 24.06.2003, Published 27.11.2003, Bulletin No. 33.

Поступила в редакцию/received: 18.05.2020; после рецензирования/reviced: 14.07.2020;
принята/accepted 29.07.2020