

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ С ЭФФЕКТОМ АДАПТАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А.М. МИГРАНОВ¹, аспирант, М.Ш. МИГРАНОВ¹, д-р техн. наук,
Н.В. КОЛОСОВА², аспирант, Э.З. АХМЕТОВА², аспирант

¹Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: migmars@mail.ru

²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, Москва, Вадковский пер., д.3а

© Мигранов А.М., Мигранов М.Ш.,
Колосова Н.В., Ахметова Э.З., 2021

Проведен анализ литературы по адаптивным материалам и износостойким покрытиям на режущем инструменте для лезвийной обработки резанием. Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований эксплуатационных свойств спеченных инструментальных материалов на основе быстрорежущей стали при дополнительном легировании присадками, обеспечивающими существенное повышение износостойкости режущего инструмента. Данное явление объяснено с позиции адаптации (самоорганизации) при трении путем формирования вторичных структур. При этом вторичные структуры играют двоякую роль: смазывающую и защитную (в виде аморфноподобных соединений).

Ключевые слова: адаптивные материалы, быстрорежущая сталь, самоорганизация, легирование, трение, термодинамика, вторичные структуры.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-23-31

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует довольно большое количество научных публикаций на тему адаптивных материалов и покрытий (АМиП). Термины «адаптивный» (от англ. to adapt – приспособливаться) и «интеллектуальный» стали широко использоваться в различных областях: материаловедении – адаптивные материалы и интеллектуальные композиты; трибологии – самоорганизующиеся покрытия, материалы со структурной приспособляемостью и т.п. Адаптивными (адаптирующимися, интеллектуальными, умными) называют материалы и покрытия, которые обладают способностью самопроизвольно приспособливаться (адаптироваться) к воздействиям внешней среды [1–3]. По существу, АМиП – это системы, способные «оценивать» внешние воздействия и реагировать на них. С этой точки зрения различают три основных вида АМиП: *пассивные* (в них вводят детекторы в виде волокон, пленок и других элементов), изменяющие свои характеристики при внешних воздействиях; *реактивные*, которые сами реагируют на внешние воздействия; *интеллектуальные*, которые не только реагируют на внешние воздействия, но и сами обеспечивают устранение их последствий, т.е. самовосстанавливаются [3, 4]. Материалы первой группы (пассивные) используют для диагностики конструкций из полимерных композитов, армированных волокнистыми наполнителями. Они работают на принципе самоконтроля состояния изделий с помощью встроенных в их структуру датчиков. Характерным признаком этих материалов является появление сигнала датчика о возникших в материале изменениях при внешних воздействиях. Наибольшее

развитие получили волоконно-оптические датчики, которые идеально подходят к структуре и технологии получения полимерных волокнистых композитов. Они представляют собой кремниевые волокна, заключенные в защитную оболочку. Эти волокна вводят в композит на стадии его формования, а затем уже в готовом изделии через волокна пропускают световой сигнал и регистрируют изменения его оптических характеристик (амплитуды, фазы и др.) под влиянием изменений, происходящих в окружающем оптическое волокно материале. Любые деформации и напряжения в композите вызывают соответствующие колебания характеристик светового сигнала. Таким образом, оптические волокна, введенные в полимерный композит, могут отслеживать при эксплуатации вибрации и деформации, разрушения и износ материала [5–7]. Материалы второй группы (реактивные) представляют собой АМиП, которые самопроизвольно реагируют на внешние механические, термические, физические и другие воздействия, изменяя собственную структуру и характеристики (геометрические, механические, физические и др.) или свойства сопряженных материалов. Реактивные материалы и конструкции имеют различные типы реагирования на изменения окружающей среды. К ним относятся самозатачивающиеся зубья, ножи и режущие кромки элементов рабочего оборудования. Они имеют двухслойную структуру из разнородных материалов, отличающихся различной износостойкостью. К более сложным системам второй группы относятся материалы, которые обладают «эффектом памяти» формы. Этот эффект заключается в восстановлении первоначальной формы пластически деформированного материала, которое происходит после его нагрева до определенной температуры [2]. К третьей группе «интеллектуальных» материалов относятся системы, которые обладают способностью не только производить самодиагностику, но и осуществлять самовосстановление. В частности, имеются сведения о разработке конструкционных материалов на основе полимерных композитов, которые, диагностируя наличие повреждений (например, микротрещин) одним из упомянутых ранее методов, реализуют механизм самовосстановления путем перераспределения материалов. Для залечивания микротрещин пытаются использовать комплексы наночастиц, которые должны обладать достаточной подвижностью, чтобы устранить дефекты структуры [3].

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В настоящее время для полноценного осуществления лезвийной обработки резанием нужно активнее использовать последние достижения в области трибологии. Термодинамические подходы к анализу контактных явлений при трении и износе отражены в работах многих исследователей по трибологии [1–5]. Трибосистема рассматривается как открытая термодинамическая система и описывается первым и вторым принципами термодинамики. Процессы разрушения и отделения частиц износа возникают и развиваются в результате увеличения (активации) и уменьшения (пассивации) энергии поверхности. Высвобождение тепла обуславливает термическую активацию процессов при трении. Величина изменения энергии поверхности играет основную роль в контактных процессах в зоне резания, определяет механизм развития новых фаз и структур, контролирует величину и тип их деформации и последующее разрушение. Активация приводит поверхностные слои в неравновесное состояние. За активацией следует пассивация с последующим взаимодействием с окружающей средой и образованием защитных структур.

Согласно второму принципу термодинамики, в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Данные процессы соответствуют уменьшению энтропии и появлению адаптирующихся рассеивающихся структур [2, 3]. В этом и заключается отличие

открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Термин «структура» в данном случае рассматривается в термодинамическом смысле как вид связи между отдельными частями системы. Для явления адаптации характерен принцип экранирования, который состоит во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Другими словами, существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда 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 адаптивных явлений в технике.

Адаптация во время трения сопровождается уменьшением эффективного объема материалов, в которых все виды взаимодействия имеют место, в том числе и локализация взаимодействий в тонких слоях на поверхности. Этот процесс происходит с максимальным расходом энергии, вплоть до разрушения. Одновременно самовосстанавливающиеся тонкие пленки появляются на трущихся поверхностях, их свойства существенно отличаются [5, 6].

В целом на основе вышеизложенного можно выдвинуть ряд требований для повышения износостойкости режущего инструмента:

необходимо ориентироваться на создание таких условий, в которых трибосистема при заданных режимах трения не выводится в область высокой неустойчивости, сопровождаемой глубинным разрушением материалов;

следует обеспечить переход из неравновесного термодинамически нелинейного состояния в равновесное стационарное с ускоренным образованием благоприятной поверхностной структуры, формирующейся в результате самоорганизации, и с оказанием необходимой «помощи» (за счет использования смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС); покрытий, позволяющих создавать благоприятное воздействие (смазывающее и охлаждающее действия путем применения поверхностно-активных веществ, изменения кинематической вязкости или интенсификаторов охлаждения, рекуперации или перераспределения теплового потока и т.д.));

нужно обеспечить протекание адаптации системы с переходом в устойчивое состояние при минимальных потерях на трение, наименьшей величине износа и других трибологических характеристиках. Решающую роль здесь играет структурная адаптация. Иногда трибосистема работает в жестких условиях, когда адаптация не успевает пройти. Нестабильная работа трибосистемы приводит к повышенному износу, тепловыделению, потерям на трение и др. В ряде случаев такая работа является естественной, и система работает в режимах высокой неравновесности в неустойчивом состоянии;

стоит предусматривать желательное направление пластической деформации, локализованное в тонком поверхностном слое (геометрическая адаптация, переменность элементов режима резания);

необходимо осуществлять оптимизацию материалов износостойких покрытий для режущего инструмента с учетом обрабатываемого материала и конкретных условий резания;

следует учитывать закономерности упругопластической деформации и температурных условий при различных режимах резания как в период приработки, так и в послеприработочный период.

Используя изложенные выше представления о механизме износа инструмента, можно сформулировать требования к поверхности инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом:

1) с позиции сопротивления адгезионно-усталостному износу в поверхности необходимы соединения, имеющие минимальную адгезию к обрабатываемому материалу и максимальную – к инструментальному материалу. С позиции усталостной прочности следует стремиться к созданию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия;

2) с позиции сопротивления абразивному износу следует иметь поверхность инструмента как можно более высокой твердости. Твердость поверхности не должна существенно уменьшаться при повышении температуры;

3) с позиции сопротивления окислительному износу соединения, входящие в состав инструментального материала (подложки), должны обладать большой термодинамической стабильностью при формировании устойчивых структур с большей износостойкостью. Иногда, наоборот, желательно, чтобы поверхностный слой (СОТС, покрытие) был активен к окислителю (кислороду или активной среде) и способствовал формированию защитных и экранирующих вторичных структур;

4) стойкость инструмента к диффузионному износу определяется прочностью химических связей составляющих его компонентов, так как диффузионному обмену будет предшествовать диссоциация этих компонентов (карбидов) на составляющие элементы (Ti, Ta, W, C). Как и в случае окислительного износа, желательна изоляция связки (Co) от контакта с обрабатываемым материалом.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера адаптации представим некоторые методы воздействия на условия трения при резании металлов путем легирования спеченных порошковых инструментальных материалов (СПИМ) нового поколения на основе быстрорежущей стали. Порошковые инструментальные материалы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана (карбидосталь), обладают высокой износостойкостью, поэтому их можно считать новым классом адаптивных инструментальных материалов. В частности, к таковым относятся СПИМ, содержащие в качестве твердой основы карбид титана, а быстрорежущую сталь (Р6М5) – как связующее (например, СПИМ + 20 % TiC или СПИМ + 20 % TiC + 5 % Al₂O₃). Адаптация таких материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные фазы (оксиды и нитриды), которые эффективно защищают поверхность от внешних воздействий при резании. При помощи электронной оже-спектроскопии и спектроскопии вторичной ионной массы было обнаружено, что в процессе резания карбиды титана превращаются в тонкие поверхностные пленки в виде соединения титана с кислородом. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах резания и повышает износостойкость режущего инструмента (рис. 1). Как показали исследования, износостойкость такого инструмента в 2–3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

Наиболее общеизвестным приемом совершенствования эксплуатационных характеристик режущих инструментов является нанесение на их рабочие поверхности функциональных адаптивных износостойких покрытий. При этом каждый слой такого покрытия должен формироваться с учетом изменения механизма изнашивания в периоды приработочного, нормального (устойчивого) и катастрофического износа. Для обеспечения данного условия, выбирая металлические материалы, мы принимали во внимание известные исследования по трибологической совместимости

контактирующих элементов [6–10]. Для имплантации были выбраны химические элементы с наименьшей совместимостью в трибопарах с железом, никелем и титаном (рис. 2), т.е. с металлами, входящими в состав обрабатываемых материалов: низколегированных, теплостойких и коррозионностойких сталей, а также титановых и никелевых сплавов, широко используемых в деталях машин. Более того, азотированная поверхность инструмента подвергалась ионному смешиванию с четырьмя типами антифрикционных сплавов, часто используемых для улучшения условий трения скольжения: сплавом на основе цинка Zn + Al(9 %) + Cu(2 %); на основе меди Cu + Pb(12 %) + Sn(8 %); на основе свинца Pb + Sn(1 %) + Cu(3 %); на основе алюминия Al + Sn(20 %) + Cu(1 %) + Si(0,5 %).

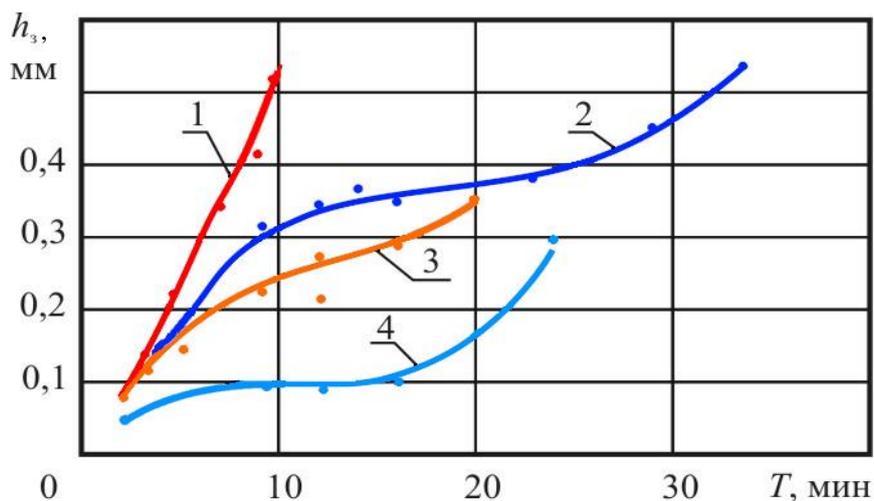


Рис. 1. Влияние времени обработки на износ режущего инструмента по задней поверхности: 1 – СПИМ + 20 % TiC; 2 – СПИМ + 20 % TiC + 2 % BN; 3 – СПИМ + 15 % TiC + 5 % Al₂O₃; 4 – СПИМ + 20 % TiCN (точение стали 45; V = 70 м/мин; t = 0,5 мм; S = 0,28 мм/об)

В работе для покрытий, которые ранее формировались на двух стадиях (диффузионного насыщения азотом – азотирования – и нанесения покрытия (TiCr)N), предлагается создать дополнительный (промежуточный, легированный) слой, имплантированный на ранее азотированную поверхность быстрорежущей стали. Как показали исследования, такое многослойное покрытие значительно увеличивает (в 2,1–2,4 раза) износостойкость режущего инструмента за счет расширения стадии нормального износа. Было исследовано влияние 16 химических элементов и 4 антифрикционных материалов, имплантированных в базовую поверхность, на износостойкость резца из быстрорежущей стали с техническим (TiCr)N покрытием на инструменте. Установлено, что лучшие позиции по износостойкости занимают покрытия с нижним слоем, модифицированным элементами, обеспечивающими высокие антифрикционные свойства. Кроме того, были рассмотрены некоторые способы улучшения «дуплексных» покрытий путем формирования слоя после дополнительной модификации подложки, причем ионное смешивание осуществлялось на предварительно насыщенной ионами азота поверхности из быстрорежущей стали. Такие многослойные покрытия позволяют увеличить период стойкости инструмента в 3–4 раза.

Было исследовано влияние на период стойкости инструмента пяти пар элементов, которые добавили в виде ионной смеси в основную поверхность подложки из быстрорежущей стали. Как видно из таблицы, наилучшая износостойкость была получена для «триплексного» покрытия с подложкой, содержащей ионную смесь (Ti + N).

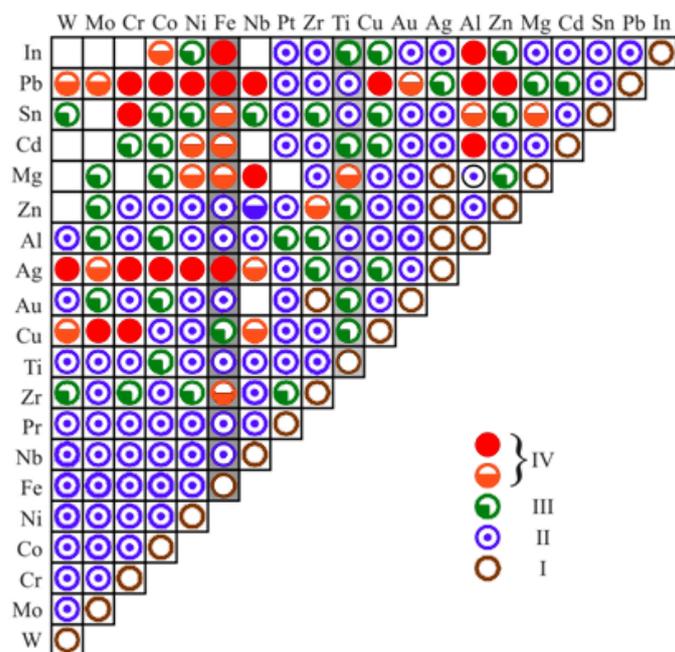


Рис. 2. Взаимная растворимость металлов с образованием бинарной фазы:
IV – низкая; III – ограниченная; II – устойчивая; I – высокая

Относительный период стойкости режущего инструмента
с триплексным покрытием

Элементы смешивания	Относительный период стойкости	
	Без охлаждения	С охлаждением
Al + O	3,0	–
Ti + N	4,0	2,5
Zr + N	0,53	–
W + N	0,4	–
W + C	1,33	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и конструирование адаптивных функциональных покрытий на основе выбора составляющих каждого отдельного слоя в соответствии с функциональным назначением (при оптимизации их последовательности и толщин) позволяют прогнозировать свойства и эксплуатационные характеристики деталей машин и металлорежущего инструмента.

По результатам экспериментальных исследований адаптивных (самоорганизующихся) материалов и покрытий можно сказать, что было сделано следующее:

показано, что спеченные порошковые материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), имеют такую особенность, как высокая износостойкость, и могут считаться новым классом адаптивных инструментальных материалов. К таковым стоит, в частности, отнести совместно спеченные и прессованные порошки карбида титана в качестве основы и быстрорежущей стали в качестве связующего вещества. Адаптация этих материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные вторичные структуры, которые эффективно защищают поверхность инструмента от внешних воздействий при резании. В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах и, как следствие, повышает износостойкость режущего инструмента. В результате износостойкость такого инструмента в 2,0–3,5 раза выше, чем износостойкость инструмента из быстрорежущих сталей;

предложена новая физическая концепция явления адаптации в мультифазовых материалах. Рассмотрены некоторые подходы к воздействию на трение и износ для порошковых инструментальных материалов нового поколения (СПИМ на основе быстрорежущей стали). Первый способ может осуществляться добавлением 5 % Al_2O_3 , что снижает коэффициент трения при рабочих температурах. Второй способ – это расширение интервала самоорганизации с помощью устойчивых высокопрочных вторичных структур, развивающихся на поверхности инструмента. Он осуществляется добавлением 2 % VN. Оба подхода можно реализовывать с помощью присадки 20 % TiCN;

установлено повышение износостойкости поверхности в результате двухступенчатого упрочнения поверхностного слоя инструмента: 1) путем диффузионного насыщения азотом (ионного азотирования быстрорежущей стали); 2) нанесения износостойкого покрытия со сложнелегированными нитридами (Ti,Cr)N. Предлагаемый вариант покрытия включает в себя также дополнительный модифицированный нижний слой, полученный ионной имплантацией поверхности быстрорежущей стали, предварительно подвергшейся азотированию в тлеющем разряде ионов азота. Такое многослойное покрытие позволяет значительно повысить (в 2,1–2,4 раза) износостойкость инструмента благодаря продлению стадии нормального износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 158 с.
2. Исаев С.И. Термодинамика. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 412 с.
3. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании // *Вестник машиностроения*. 2003. № 10. С. 53–59.
4. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.

5. Fox-Rabinovich G., Gershman I.S., Yamamoto K., Dosbaeva J., Veldhuis S. Effect of the Adaptive Response on the Wear Behavior of PVD and CVD Coated Cutting Tools during Machining with Built Up Edge Formation // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. №. 12. P. 2489.
6. Gershman I., Gershman E.I., Mironov A.E., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. Application of the self-organization phenomenon in the development of wear resistant materials – A Review // *Entropy*. 2016. V. 18. No. 11. P. 385.
7. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСиС, 2005. 362 с.
8. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 3. P. 245–250.
9. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Improve wear resistance of composite coatings on cutting tool from high-speed steel // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019. V. 1281. No. 1. P. 012053.
10. Krioni N.K., Migranov M.S., Fox-Rabinovich G.S., Shuster L.S. Study of the tribotechnical properties of a cutting tool made of sintered powder tool materials // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 1. P. 12–18.

Для цитирования: Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 23–31.

INNOVATIVE MATERIALS AND COATINGS WITH THE EFFECT OF ADAPTATION WHEN CUTTING METALS

A.M. MIGRANOV¹, Postgraduate, M.Sh. MIGRANOV¹, Dr. Sc.,
N.V. KOLOSOVA², Postgraduate, E.Z. AKHMETOVA², Postgraduate

¹Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

²Moscow State University of Technology «STANKIN»,
3a, Vadkovsky lane, 127055, Moscow, Russian Federation

The literature on adaptive materials and wear-resistant coatings on cutting tools for blade cutting is analyzed. The results of theoretical and experimental studies of the operational properties of sintered tool materials based on high-speed steel with additional alloying with additives, which provide a significant increase in the wear resistance of the cutting tool, are presented and this phenomenon is explained from the point of view of adaptation (self-organization) during friction by forming secondary structures. In this case, the secondary structures play a dual role: lubricating and protective in the form of amorphous compounds.

Keywords: adaptive materials, high-speed steel, self-organization, alloying, friction, thermodynamics, secondary structures.

REFERENCES

1. Ivanova V.S. Sinergetika: Prochnost i razrusheniye metallicheskikh materialov [Synergetics: Strength and degradation of metallic materials]. Moscow: Nauka, 1992. 158 p.
2. Isaev S.I. Termodinamika [Thermodynamics]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 412 p.
3. Kabaldin Yu.G. Self-organization in the processes of friction and lubrication during cutting. *Vestnik mashinostroyeniya*. 2003. No. 10, pp. 53–59. (In Russian).
4. Prigozhin I., Kondipudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow: Mir, 2002. 461 p.
5. Fox-Rabinovich G., Gershman I.S., Yamamoto K., Dosbaeva J., Veldhuis S. Effect of the Adaptive Response on the Wear Behavior of PVD and CVD Coated Cutting Tools during Machining with Built Up Edge Formation. *Nanomaterials*. 2020. V. 10. No. 12, pp. 2489.
6. Gershman I., Gershman E.I., Mironov A.E., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. Application of the self-organization phenomenon in the development of wear resistant materials – A Review. *Entropy*. 2016. V. 18. No. 11, pp. 385.
7. Bokshcheyn B.S., Yaroslavtsev A.B. Diffuziya atomov i ionov v tverdykh telakh [Diffusion of atoms and ions in solids]: Moscow: MISIS, 2005. 362 p.
8. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No 3, pp. 245–250.
9. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Improve wear resistance of composite coatings on cutting tool from high-speed steel. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019. V. 1281. No. 1, pp. 012053.
10. Krioni N.K., Migranov M.S., Fox-Rabinovich G.S., Shuster L.S. Study of the tribotechnical properties of a cutting tool made of sintered powder tool materials. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No. 1, pp. 12–18.

Поступила в редакцию/received: 31.05.2021; после рецензирования/revised: 30.07.2021;
принята/accepted: 30.08.2021