

АТОМНЫЙ МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ЕГО ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ И ДИАГНОСТИКА В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород*

Ключевые слова: режущий инструмент, атомный механизм изнашивания, нейросетевая модель изнашивания, нейронная сеть выбора состава покрытия, цифровое производство, диагностика.

Аннотация. Изложен атомный механизм изнашивания твердых сплавов, основанный на образовании металлических связей валентными электронами обрабатываемого и инструментального материалов. Разработаны нейросетевые модели изнашивания режущего инструмента и выбора износостойких покрытий.

В настоящее время известен ряд механизмов изнашивания режущего инструмента [1,2]. На основании изучения износостойкости инструментальных материалов и их зависимости от энергии трения, можно представить общую картину их разрушения при резании.

Для того чтобы произошел износ, поверхность трения должна быть деформирована и разрушена, т.е. внешней силе необходимо совершить работу. Эта механическая работа равна произведению силы, действующей на поверхности трения, на путь трения. Приложение к твердому телу внешней силы вызывает напряжение в межатомных связях. Наличие различных сил сопротивления (дислокации, дефекты и т.д.) обуславливают переход части подведенной механической энергии в тепловую. Тепловая энергия, распространяясь в глубь структуры, накапливается в местах, имеющих отклонение от кристаллического строения. В результате при трении в поверхностных слоях инструмента формируются очаги разрушения межатомных связей, развитие которых, заканчивается деградацией структуры и отделением частиц износа.

Атомный механизм изнашивания инструмента основывается на следующих положениях. Процесс резания обуславливает формирование ювенильно чистых контактных поверхностей. Атомы на поверхности имеют ненасыщенные связи по сравнению с атомами, находящимися на некотором расстоянии от поверхности. Это способствует, согласно теории В.К.Григоровича [3], образованию множественного перекрыванию валентных орбиталей и к их коллективизации. В результате образуется прочные металлические связи, а периодическое образование таких связей при трении и их разрыв вызывает износ инструмента.

На рис. 1 представлена зависимость температуры плавления и теплоты образования тугоплавких соединений от числа валентных электронов по справочным данным. Из рис. 1 следует, что наибольшим числом n -валентных электронов обладает карбид вольфрама WC . Из чистых металлов соответственно: Fe- 6, Co-9, Ti-4.

Анализ рис. 1 показывает, что из тугоплавких соединений наибольшее число валентных электронов имеют карбиды вольфрама WC, а из металлов, согласно справочным данным, кобальт. Поэтому уточненный механизм изнашивания твердосплавного инструмента основывается на преимущественном начальном износе кобальтовой связки, что приводит к обнажению зерен карбидов, а периодическое образование и разрыв металлических связей при трении приводит к их раскачке и вырыву. На рис. 2 приведена микрофотография поверхности изнашивания твердого сплава BK8 при резании стали 45.

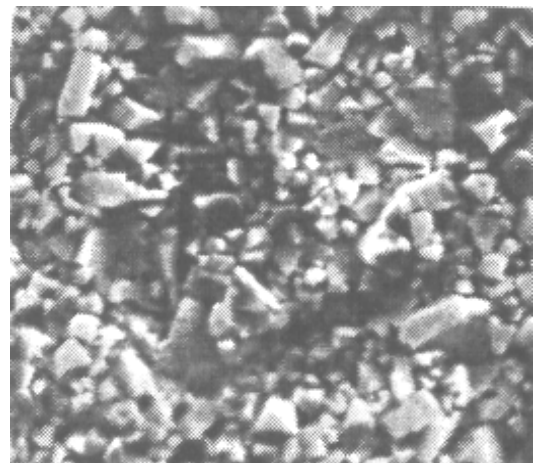
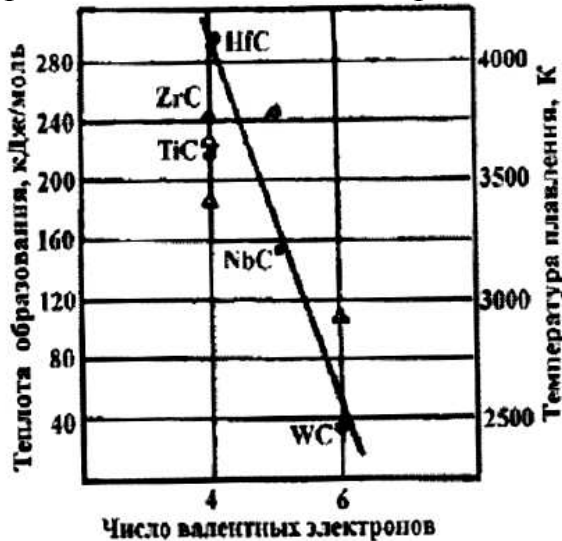


Рис. 2 Микрофотография износа твердосплавного инструмента: BK8, V=15м/мин, сталь 45 (x5000)

Рис. 1. Зависимость температуры плавления и теплоты образования карбидных фаз от числа валентных электронов

Разработанный атомный механизм изнашивания твердосплавного инструмента объясняет низкую сопротивляемость изнашиванию вольфрамкобальтовых твердых сплавов при резании сталей и высокую их износостойкость при обработке титановых сплавов, имеющих меньшее количество валентных электронов, чем железо.

В ряде работ [2] показано, что при резании почти вся механическая энергия (работа), затрачиваемая на деформирование, разрушение и трение, переходит в тепловую. Небольшая часть механической энергии (примерно 3%) расходуется на внутрикристаллические преобразования. Тепловая энергия оказывает значительное влияние на процессы деформирования при резании, работоспособность режущей части инструмента и физические процессы, возникающие на рабочих поверхностях инструмента.

Расчет q_n плотности теплового энергетического потока, проходящего через объемы поверхностного слоя толщиной h , можно оценить по формуле

$$q_n = \frac{q_F \cdot V}{h}, \tag{1}$$

где q_F - удельные касательные напряжения; V - скорость резания; h - толщина прирезцового деформированного слоя.

Расчеты показывают, что мощность энергетического потока превышает прочность межатомных связей ($\approx 10^{11}$ Дж/м²), т.е. способствует образованию

несплошностей (микротрещин). Причем, их возникновение может носить взрывной характер ($\approx 10^{15}$ с).

В связи с изложенным, при установившемся процессе изнашивания инструмента будем считать, что вся тепловая энергия поглощается зернами карбидной фазы, в которых будет запасаться энергия, равная предельной ΔE_{np} энергии разрушения. За предельную энергию разрушения в первом приближении примем ΔH - теплоту образования тугоплавкого соединения. В связи с этим, интенсивность изнашивания зерен карбидной фазы на контактных поверхностях инструмента можно представить в виде:

$$J = q_n / \Delta H, \quad (2)$$

где: q_n – мощность теплового потока; ΔH – теплота образования тугоплавкого соединения.

Одним из новых подходов к определению характеристик износа лезвийного инструмента, является использование нейронных сетей для моделирования контактных процессов при резании [5]. Применение обучаемой нейронной сети в качестве модели, позволяет заменить сложную многомерную функциональную зависимость, более простой сетевой структурой.

Как указывалось выше в (1), интенсивность изнашивания твердых сплавов определяются удельной силой q_F трения, скоростью перемещения трущихся тел V , прочностью межатомных связей, которая характеризуется предельной энергией разрушения ΔE_{np} тугоплавкого соединения, равная в первом приближении их ΔH .

Несмотря на то, что величина ΔH , присутствующая в знаменателе выражения (2), является константой, определяемой природой тугоплавкого соединения, а скорость V резания входит в формулу (2) в качестве линейного множителя, общая зависимость интенсивности износа J твердосплавного инструмента от скорости обработки носит немонотонный характер [3]. Это объясняется, в первую очередь, нелинейной зависимостью величины силы трения F_T от режима резания [2], также входящей в расчетную формулу (1).

При механической обработке наибольшее затруднение вызывает определение величины удельной силы q_F трения. Для нахождения силы трения расчетным путем, по косвенным измерениям, используют следующее выражение:

$$q_F = 0,28 \cdot S_k, \quad (3)$$

где q_F – удельная сила трения; S_k – предел прочности металла в шейке образца при растяжении.

На практике такой метод нахождения q_F означает периодическую остановку процесса резания для определения длины контакта S , путем трудоемких оптических измерений остаточного следа стружки (которые к тому же сложно выполнить непосредственно на станке) и, поэтому, совершенно непригоден в автоматизированном производстве.

Значения q_F для некоторых инструментальных и обрабатываемых материалов можно рассчитать, используя известные зависимости сил трения и температур [2]. Но в этом случае возникает необходимость использования на металлорежущем станке дополнительных датчиков для качественного измерения температуры и вычисления множества температурных поправок, связанных с тем, что термодатчики практически невозможно разместить в зоне резания.

Выходом из этой ситуации является использование в качестве температурного датчика естественной термопары, образующейся на участке непосредственного соприкосновения инструмента и детали. Естественно, что параметры такого датчика не статичны, а динамическим образом зависят от площади контакта твердосплавного инструмента и стальной детали, то есть, в конечном счете, зависят от удельной силы трения.

Экспериментальные исследования показывают, что выходной параметр естественной термопары - термо-ЭДС (U_t) является функцией от скорости резания. Таким образом, интенсивность изнашивания режущего инструмента можно представить в виде зависимости трех аргументов:

$$J = f(U_t(F_3, v), v, \Delta E_{np}), \quad (4)$$

где f - неизвестный функционал, определяемый по экспериментальным данным.

В условиях автоматизированного и цифрового производства остро стоит проблема, как получения аналитических зависимостей изнашивания, так и диагностика износа в режиме реального времени.

В настоящее время на отечественных предприятиях под «цифровизацией» в основном понимают разработку 3D моделей. Однако, на наш взгляд, «цифровизация» - это разработка цифровых моделей, близких к реальным, различных производственных процессов, оборудования, других устройств.

Цифровой двойник (digital twin) новое слово в моделировании оборудования, техпроцессов и планировании производства. Это совокупность цифровых (математических) моделей, в частности нейронносетевых, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи как на отдельном объекте, так и в рамках целого производственного предприятия с использованием анализа больших данных (Big data).

Применение цифрового двойника, (нейронносетевых моделей), являющегося точной копией реального актива, помогает быстро найти наиболее эффективные режимы работы, выявить потенциальные риски, встроить новые технологии в существующие производственные линии, сократить сроки и стоимость реализации проектов. Кроме того, цифровой двойник помогает определить шаги по обеспечению информационной безопасности

Использование нейросетевого имитационного моделирования контактных процессов при резании позволяет сформировать «виртуальный» датчик для диагностики выходных параметров резания, в том числе для динамического измерения интенсивности изнашивания режущего инструмента. Данный метод относится к методам косвенного измерения. Точность таких измерений зависит от того, насколько точная использовалась модель процесса трения или от класса точности прибора, используемого для снятия данных для обучающей выборки. Для нахождения f используем двухслойную (имеющую два слоя активных нелинейных элементов) нейронную сеть обратного распространения.

Поиск оптимальной структуры сети проводился путем имитационного моделирования при помощи пакета программ Matlab 6. В результате моделирования было рассмотрено несколько структур нейронных сетей с различными преобразующими функциями нейронов. Их обучение проводилось на обучающей выборке, полученной путем проведения серии однофакторных

экспериментов по точению стали 45 и твердосплавными пластинками на различных режимах резания. За оптимальную принята структура сети, дающая наименьшую максимальную ошибку за определенный период времени обучения.

Поиск оптимальной структуры сети проводился путем имитационного моделирования при помощи пакета программ Matlab 6. В результате моделирования было рассмотрено несколько структур нейронных сетей с различными преобразующими функциями нейронов. Их обучение проводилось на обучающей выборке, полученной путем проведения серии однофакторных экспериментов по точению стали 45 твердосплавными пластинками на различных режимах резания. За оптимальную принята структура сети, дающая наименьшую максимальную ошибку за определенный период времени обучения.

Структура оптимальной нейронной сети (цифрового двойника) представлена на рис. 3. Первый слой сети содержит 6 нейронов, второй, выходной слой состоит из одного нейрона. В качестве функции активации нейронов обоих слоев используется экспоненциальный сигмоид.

Осаждение покрытий из тугоплавких соединений повышает их износостойкость, прежде всего, из-за отсутствия кобальтовой связки и наноструктурных размеров зерен. На основе большой базы данных, основанных на литературных источниках [4,5], включающих обработку широкого круга обрабатываемых металлов с различной твердостью и использование при этом существующие составы покрытий получена статистическая зависимость твердости покрытия от твердости обрабатываемого материала (рис.4).

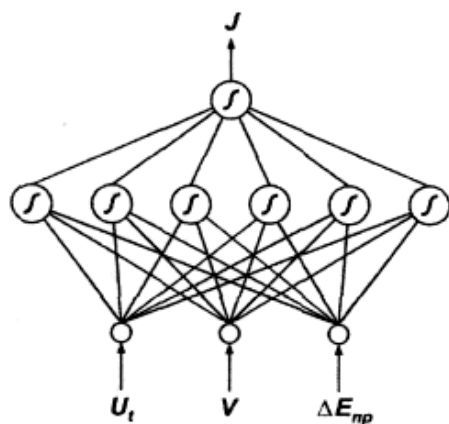


Рис. 3. Структура нейронной сети износа режущего инструмента

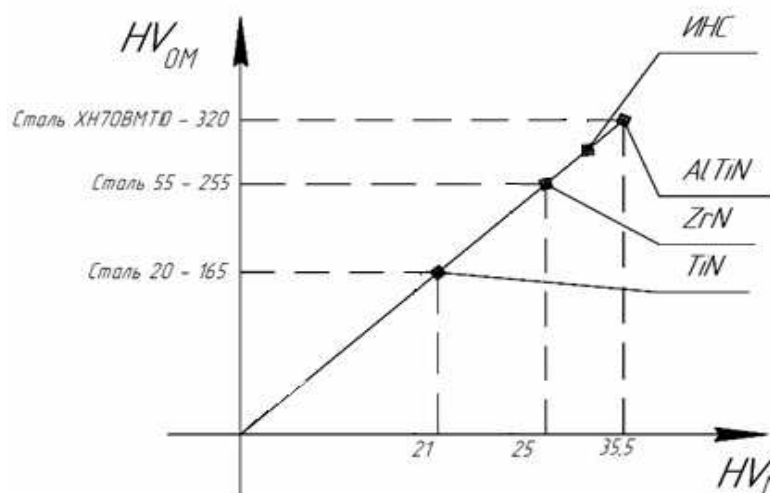


Рис. 4 Зависимость твердости покрытий от твердости обрабатываемого материала

Из рис. 4 следует, что чем выше твердость обрабатываемого материала, тем большую твердость должно иметь износостойкое покрытие.

Это достигается за счет использования более жаропрочного металла (ZrN), либо композиционного покрытия (AlTiN). В работе [7], показано, что твердость тугоплавких соединений зависит от числа валентных электронов.

На рис. 5 показана микрофотография характера изнашивания покрытия TiN при обработке нержавеющей стали 12X18H9T. Это покрытие показало наименьшую износостойкость по сравнению с покрытиями ZrN и TiAlN. На рис.6

представлена нейронносетевая модель (цифровой двойник) выбора состава износостойкого покрытия.

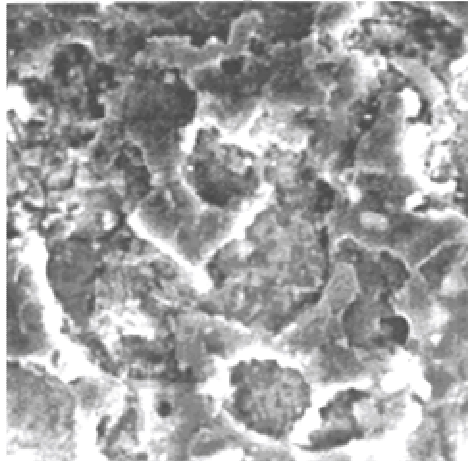


Рис. 5. Микрофотография характера износа покрытия TiN при обработке нержавеющей стали:
 $V = 60$ м/мин, $S=0.2$ мм/об

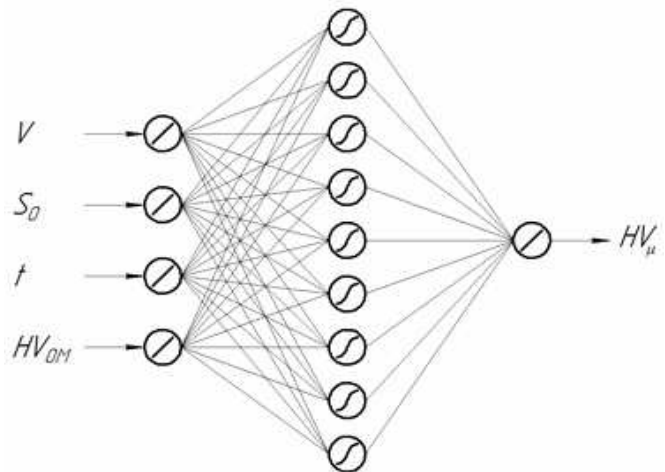


Рис. 6. Нейронносетевая модель (цифровой двойник) выбора состава износостойкого покрытия

Цифровой двойник (рис.6) позволяет на стадии проектирования техпроцесса, симулировать технологом наиболее износостойкое покрытие в зависимости от твердости заготовки, не проводя дорогостоящих стойкостных испытаний.

В условиях цифрового производства важно как прогнозировать, так и управлять процессом изнашивания режущего инструмента. В этой связи, на основе нейронносетевой модели изнашивания инструмента (рис. 3), разработана нейронная сеть, позволяющая диагностировать его износ в режиме реального времени.

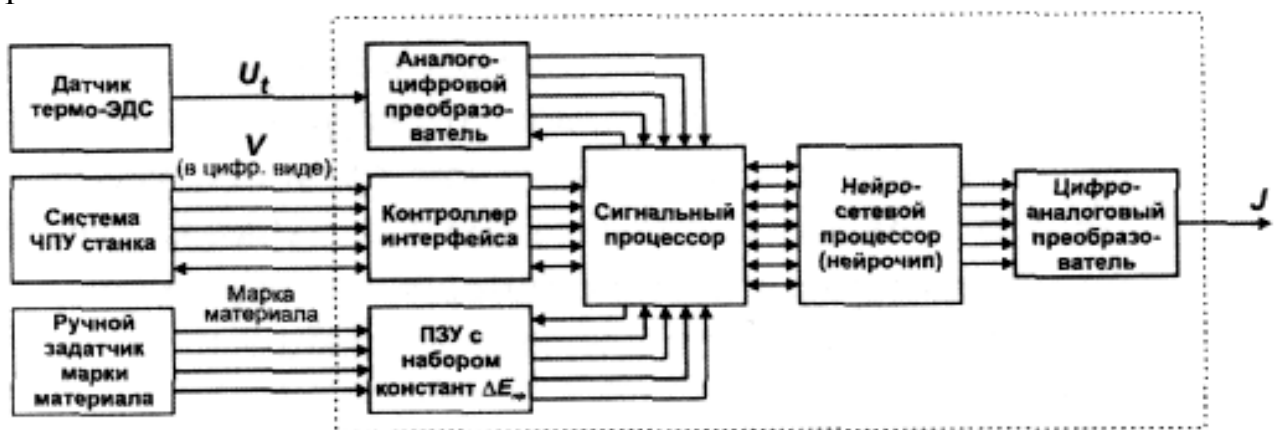


Рис. 7. Функциональная схема аппаратной реализации нейронной сети динамической диагностики интенсивности износа твердосплавного режущего инструмента

Аппаратно предлагаемая система нейронносетевой диагностики износа инструмента может быть выполнена на основе небольшого количества микроэлектронных компонентов, большинство из которых широко используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами (рис.7). Для динамической регистрации значений термо-ЭДС U_t в состав

аппаратной модели входит аналого-цифровой преобразователь. Текущие значения скорости резания V предполагается получать из системы ЧПУ станка, посредством специального контроллера интерфейса. Величины предельной энергии разрушения $\Delta E_{пр}$ (ΔH) для различных инструментальных материалов хранятся в виде констант внутри постоянного запоминающего устройства (ПЗУ). Координацию действий и управление входным и устройствами модели выполняет сигнальный процессор, а всю вычислительную нагрузку по обработке данных берет на себя специализированный нейросетевой процессор, содержащий в своих регистрах памяти нейросетевую имитационную модель контактных процессов при резании, полученную на этапе обучения. В качестве конечного формиратора выходного параметра модели - интенсивности J износа инструмента используется цифро-аналоговый преобразователь.

Список литературы

1. Лолодзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.
3. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. – М.: Наука, 1988. – 296 с.
4. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с покрытием. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
5. Кабалдин Ю.Г., Крети́нин О.В., Шатагин Д.А., Власов Е.Е. Выбор состава и структуры износостойких наноструктурных покрытий для твердосплавного режущего инструмента на основе квантово-механического моделирования. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 216 с.
6. Искусственный интеллект и кибер - физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве: монография / Ю.Г. Кабалдин и др. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. – 271с.
7. Андриевский А.Р., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справочник. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1989. – 368 с.

Сведения об авторах:

Кабалдин Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Кузьмишина Анастасия Михайловна – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Шатагин Дмитрий Александрович – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород;

Аносов Максим Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород.

ATOMIC MECHANISM OF DECOMPOSITION OF A SOLID-ALLOID CUTTING TOOL, ITS ELECTRONIC MODEL AND DIAGNOSTICS IN MECHANICAL PROCESSING DIGITAL PRODUCTION

Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M., Shatagin D.A., Anosov M.S.

Keywords: cutting tool, atomic wear mechanism, neural network wear model, neural network for selection of coating composition, digital production, diagnostics.

Abstract. The atomic mechanism of wear of hard alloys based on the formation of metal bonds by the valence electrons of the processed and tool materials is described. Neural network models for cutting tool wear and selection of wear resistant coatings have been developed.

References

1. Loladze T.N. Durability and wear resistance of the cutting tool. M.: Mechanical Engineering, 1982. 320 p.
2. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of cutting metals. M.: Mechanical Engineering, 1975. 344 p.
3. Grigorovich V.K. Metal bond and metal structure. M.: Science, 1988. 296p.
4. Vereshchaka A.S. Efficiency of coated cutting tools. M.: Mechanical Engineering, 1993. 336 p.
5. Kabaldin Yu.G., Kretinin OV, Shatagin DA, Vlasov E.E. The choice of composition and structure of wear-resistant nanostructured coatings for carbide cutting tools based on quantum mechanical modeling. M.: Innovative engineering, 2017. 216 p.
6. Artificial intelligence and cyber - physical machining systems in digital production: monograph / Yu.G. Kabaldin et al. Nizhny Novgorod: Nizhegorod. state tech. un-t named R.E. Alekseev, 2018. 271 p.
7. Andrievsky A.R., Spivak I.I. The strength of refractory compounds and materials on their basis. Directory. Chelyabinsk: Metallurgy. Chelyabinsk branch. 1989. 368 p.

UDC 629.365

<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2019-2-122-124>

AUTONOMOUS MOBILE ROBOT FOR EMERGENCY SITUATIONS

*Rachkov M.Yu., Emelyanov A.M., Kolot V.Yu.
Moscow Polytech, Moscow*

Keywords: autonomous robot, reconfigurable design, off-road locomotion, emergency work, simulation.

Abstract. The article describes research results of a new transport robot type with enhanced functionality due to the possibilities of overcoming various obstacles as well as high-speed motion along even surfaces by reconfiguring its structure to a kind of the motion surface. The robot allows automating various types of work in zones of increased danger to humans and in hard-to-reach areas. The robot has wide opportunities to move over a rough terrain as well as to overcome obstacles of various shapes, including obstacles with a height greater than the height of the tracked groups. The experimental model with remote control based on standard components has been implemented. Efficiency of the experimental model was tested with remote manual control over the radio channel.

In emergency situations, for example, in case of fires or during hazardous operations, such as demining, it is necessary to deliver appropriate technological, inspection or rescue equipment to the working area in automatic mode. A convenient solution to the problem is the use of autonomous robots that have specified equipment on board.

The proposed design of the robot contains a combined drive system consisting of transformable tracked and wheel groups (Fig. 1).

The robot has two tracked drives located on technological platform sides, and two wheel drives mounted to the front and back parts of the platform between the tracked groups [1]. A peculiarity is that the axles of the wheel drives are connected with the platform by means of levers. The lever drives are placed on the platform with the