

УДК 621.902:669.018

В. А. Агеев, канд. физ-мат. наук (ФТИ НАН Беларуси);
 Н. В. Бурносов, канд. техн. наук (БГТУ);
 О. Ю. Пискунова, инженер (БГТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПЛАЗМЕННО-ВАКУУМНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

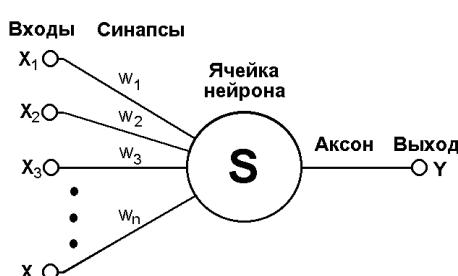
Постоянное расширение ассортимента обрабатываемых материалов в сочетании с созданием новых составов и композиций инструментальных материалов делает весьма актуальными поиски малозатратных методов стойкостных испытаний лезвийного инструмента для выбора оптимальных режимов его эксплуатации.

Constant widening assortment of process materials in confusion with creation new compositions for tool materials makes be current the search inexpensive methods of tests blade instrument for the choice opera thing regimes.

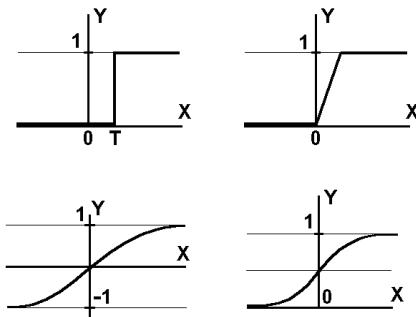
Введение. Для описания процессов износа инструмента возможно применение искусственных нейронных сетей (ИНС). Цель данной работы – рассмотреть возможность применения информационных моделей на основе ИНС для оценки стойкостной устойчивости твердосплавного металлорежущего инструмента после ионно-плазменной обработки (ИПО).

Основная часть. Основные положения ИНС. Следует сразу отметить, что широкий круг задач, решаемый ИНС, не позволяет в настоящее время создавать универсальные сети, вынуждая разрабатывать специализированные ИНС, функционирующие по различным алгоритмам [1–3].

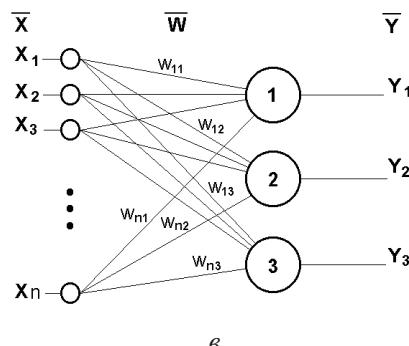
Основу каждой ИНС составляют относительно простые, в большинстве случаев – однотипные элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов мозга. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием (по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены либо заторможены). Он обладает группой синапсов (однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов), а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Общий вид искусственного нейрона (ячейки нейронной сети) приведен на рис. 1, а.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид искусственного нейрона – элементарной ячейки ИНС (а),
 активационные функции искусственного нейрона (б)
 и пример простейшей ИНС – однослойного трехнейронного перцептрона (в)

Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом w_i , который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости. Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i - T, \quad (1)$$

где T – пороговое значение.

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$y = f(s), \quad (2)$$

где функция f называется активационной и может иметь различный (линейный либо нелинейный) вид, наиболее типичный из которых показан на рис. 1, б. Одной из наиболее распространенных является нелинейная функция с насыщением – логистическая функция, или сигмоид (функция S-образного вида [1]):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot x}}. \quad (3)$$

С уменьшением α сигмоид становится более пологим (при $\alpha = 0$ вырождаясь в горизонтальную линию на уровне 0,5), а с увеличением α сигмоид приближается по внешнему виду к функции единичного скачка с порогом в точке $x = 0$. Из выражения для сигмоида видно, что выходное значение нейрона лежит в диапазоне [0,1]. Отметим ценные свойства сигмоидной функции – простое выражение для ее производной:

$$f'(x) = \alpha \cdot f(x) \cdot (1 - f(x)), \quad (4)$$

и дифференцируемость на всей оси абсцисс, что используется в некоторых алгоритмах обучения. Кроме того, сигмоидная функция обладает свойством усиливать слабые сигналы лучше, чем большие, и предотвращает насыщение от больших сигналов, так как они соответствуют областям аргументов, где сигмоид имеет пологий наклон. Всем ИНС присущ принцип параллельной обработки сигналов, который достигается путем объединения большого числа нейронов в так называемые слои и соединения определенным образом нейронов различных слоев, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется по слойно. В качестве примера на рис. 1, в показана простейшая ИНС, состоящая из трехнейронного перцептрона, т. е. сеть, нейроны которой имеют активационную функцию в виде единичного скачка. На n входов однослойной сети поступают некие сигналы, проходящие по синапсам на три нейрона, образующие единственный слой этой ИНС, и выдающие три выходных сигнала:

$$y_i = f \left[\sum_{j=1}^n x_j \cdot w_{i,j} \right], \quad (5)$$

где $i = 1-3$ и $j = 1-3$.

Теоретически число слоев и число нейронов в каждом слое может быть произвольным, но фактически оно ограничено ресурсами компьютера. Выбор структуры ИНС осуществляется в соответствии с особенностями и сложностью задачи. Обычно руководствуются несколькими основополагающими принципами: возможности сети возрастают с увеличением числа ячеек сети, плотности связи между ними и числом выделенных слоев; введение обратных связей наряду с увеличением возможностей сети поднимает вопрос о ее динамической устойчивости; усилинию мощи ИНС также способствует сложность алгоритмов функционирования сети (в частности, например, введением нескольких типов синапсов – возбуждающих, тормозящих и др.). Следует отметить, что выбор архитектуры сети является достаточно сложной задачей и зачастую представляет собой процесс интуитивного подбора на основе перебора различных вариантов, так как окончательное решение модели зависит от начальных установок сети и его практически невозможно интерпретировать в традиционных аналитических терминах, которые обычно применяются при построении теории явления.

Очевидно, что процесс функционирования ИНС зависит от величин синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой сети, необходимо найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов; при этом некоторые синаптические связи могут быть постоянными.

Этот этап называется обучением ИНС, и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней задачи во время эксплуатации. На этапе обучения кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью и приходится выбирать на основе компромисса. Обучение ИНС может происходить как с учителем, так и без него. В первом случае сети предъявляются значения как входных, так и желательных выходных сигналов, и она по некоторому внутреннему алгоритму подстраивает веса своих синаптических связей. Во втором случае выходы сети формируются самостоятельно, а веса изменяются по алгоритму, учитывающему только входные и производные от них сигналы. Существует множество различных алгоритмов обучения, которые, однако, делятся на два больших класса: детерминистические и стохастические. В первом из них подстройка весов представляет собой жесткую последовательность действий, а во втором – она производится на основе действий, подчиняющихся некоторому случайному процессу.

В рамках данной работы проводилось моделирование износа инструмента от параметров резания с помощью NNTool представленного в пакете Matlab 6.5 [2] с обучением сети, которое проводилось с использованием алгоритма шкалированных связанных градиентов (функция обучения ‘trainscg’). В нашем случае была создана нейронная сеть, содержащая скрытый слой из 60 ядер с тремя входными (v – скорость резания, s – подача, T – время точения) параметрами и одним выходным (h – ширина ленточки износа задней поверхности резца). Такую сеть можно интерпретировать как модель вход-выход, в которой синаптические веса и пороговые смещения нейронов являются свободными параметрами модели. Нейросетевая модель, построенная по принципу вход-выход, является статической, так как выходное значение модели определяется только значением текущего актуального входа и не зависит от предыстории входного воздействия. Обучающая выборка нейронной сети (рис. 2) формировалась по результатам предварительных стойкостных испытаний на основе сопоставления величины износа инструмента при различных вариациях режима резания [4–6]. В целях ускорения обучения некоторые параметры применяемой функции были скорректированы.

Экспериментальные результаты. Упроч-

няющие титансодержащие покрытия наносились с использованием установки УРМ3.279.048, оснащенной электродуговым торцевым холловским ускорителем металлической плазмы с холодным катодом.

Перед нанесением покрытий осуществлялась ионная очистка и нагрев поверхности инструмента до 573–1073 К путем бомбардировки ионами титана с энергией 0,8–2,0 кэВ при остаточном давлении $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

После этого осаждались композиционные (многослойные) износостойкие покрытия на основе карбида (TiC), нитрида (TiN) или карбонитрида титана (TiCN) с химически осажденным никель-фосфорным ((90–92)Ni-(8–10)P) либо плазменно-вакуумным осажденным в аморфной фазе титановым подслоем при общей толщине, не превышающей 9 мкм [6, 7]. Выбор такого подслоя в качестве барьера между инструментальным материалом и износостойким покрытием обусловлен удачным сочетанием свойств: низкой пористостью, высокой теплопроводностью и твердостью, хорошей адгезией к твердому сплаву. Осаджение никель-фосфорного подслоя осуществляли путем восстановления никеля из раствора соли гипофосфита никеля с разложением ее при повышенной (363–368 К) температуре в кислой среде [8].

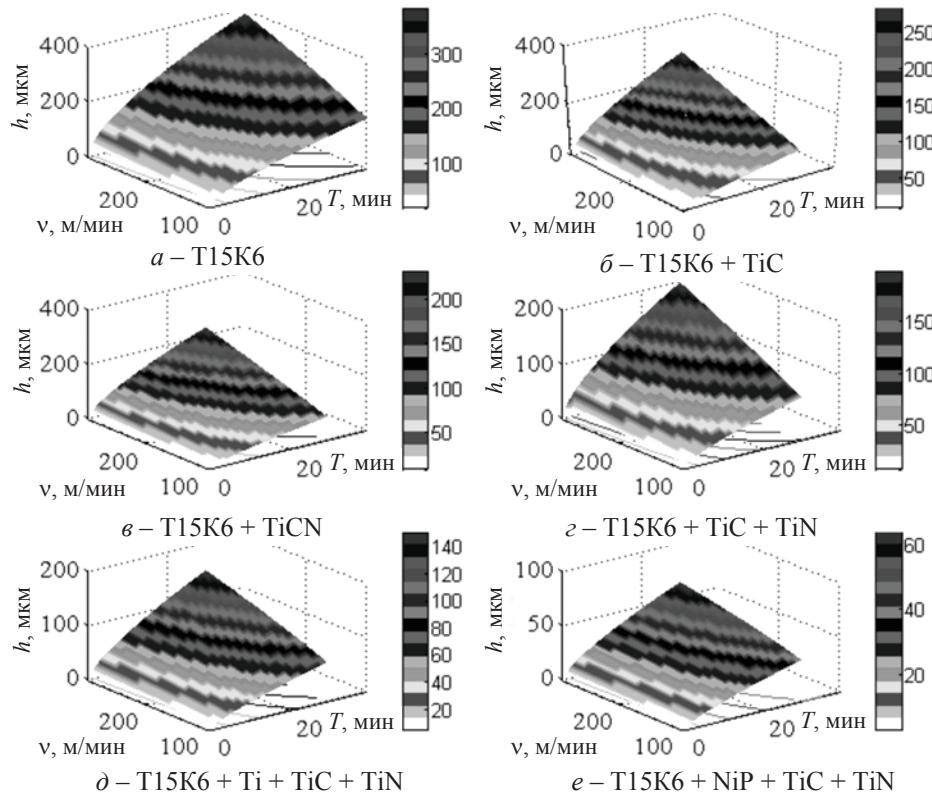


Рис. 2. Результаты предварительных исследований износа твердосплавного инструмента (T15K6 (a) с износостойкими покрытиями из TiC (b), TiCN (c), TiC + TiN (d) и Ti + TiC + TiN (e), использовавшиеся в качестве обучающей выборки (v – скорость резания; $s = 1$ мм/об – подача; T – время; h – ширина ленточки износа задней поверхности резца при глубине резания $t = 1$ мм)

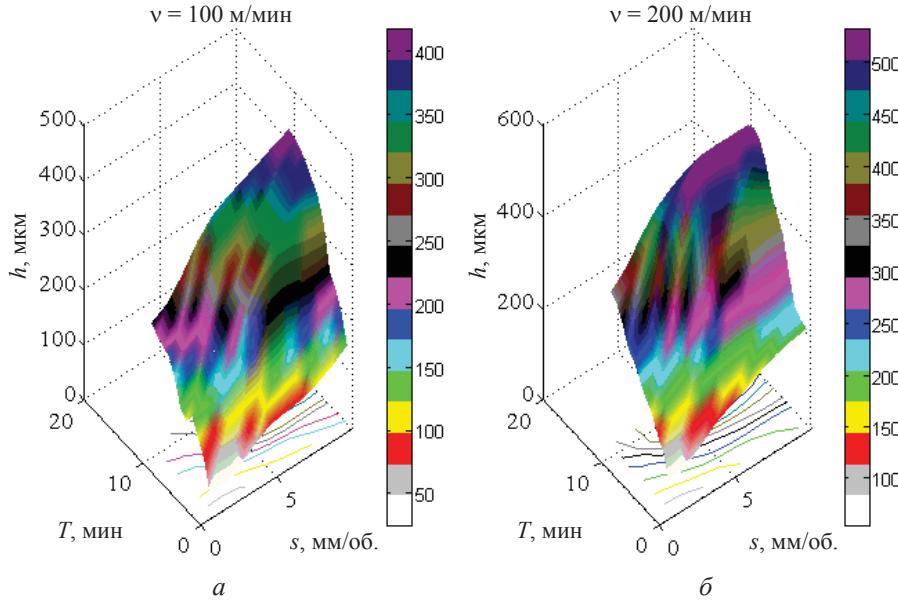


Рис. 3. Нейросетевое моделирование точения стали 45 твердосплавными пластинами Ti15K6 с композиционными покрытиями TiC + TiN (а) NiP + TiC + TiN (б) для скоростей резания 100 м/мин (а) и 200 м/мин (б)

Осаждение карбида и нитрида титана проводилось при давлении пропана-бутана или азота в камере 0,075 и 0,14 Па соответственно, токе дуги 80 А и отрицательном потенциале смещения 70 В. Карбонитридное покрытие (TiCN) синтезировалось при плавном изменении давления напускаемых газов, что обеспечивало формирование отрицательного к внешней границе градиента концентрации карбидной и положительного – нитридной фаз; при этом давление в камере поддерживалось на отметке 0,15 Па, а соотношение парциальных давлений в конечном итоге составляло 1 : 7. Вследствие одинаковой кристаллической структуры и близких параметров решеток реализовывался плавный переход от внутреннего слоя из карбида титана к внешнему слою из нитрида титана. Стойкостные испытания проводились на токарно-винторезном станке модели 1К62 при точении стали 45 (НВ 180); условия резания изменялись так, чтобы охватить чистовые и получистовые режимы обработки: скорость резания $v = 100\text{--}300$ м/мин, подача $s = 0,1\text{--}1$ мм/об., глубина резания $t = 1,0\text{--}3,0$ мм, продолжительность точения $T = 5\text{--}60$ мин. Стойкость инструмента фиксировали по ширине ленточки износа задней поверхности h в микрометрах. Для определения износа применялся микроскоп МИМ-8. На рис. 3 представлены результаты нейросетевого моделирования точения стали 45 твердосплавными пластинами с композиционными покрытиями.

Размеры твердосплавных пластин соответствовали форме 0201A (05114-120408 /ГОСТ 10059-80/), геометрические параметры режущей части вы-

бранны с учетом нормативных данных: главный угол 60° , вспомогательный угол в плане 15° , вспомогательный задний угол 8° , передний угол $+10^\circ$, передний угол по фаске -5° , ширина фаски 0,5 мм, радиус при вершине 0,5 мм.

Результаты, приведенные на рис. 3, практически аналогичны данным, полученным с применением традиционных методик испытаний [4–7, 9]. Более того, результаты моделирования показали существенное влияние подслоя (аморфного титана или никель-фосфорного) на стойкость инструмента.

Как показали металлографические, электронно-микроскопические и рентгенографические исследования, воздействие высокоэнергетических ионов титана на никельфосфорную пленку сопровождается: образованием в твердом сплаве переходного слоя диффузионного характера, что способствует повышению адгезионной прочности покрытия; перестройкой кристаллической решетки пленки с диспергированием фазы Ni_3P , приводя к существенному увеличению микротвердости титанодержащего слоя покрытия; снижением пористости и заливанием дефектов и микротрещин, этим самым уменьшая вероятность зарождения трещин и разрушения инструмента с покрытием в процессе эксплуатации.

Следует отметить, что аналогичные процессы наблюдались при облучении лазерным излучением умеренной плотности мощности химических покрытий системы Ni-P на инструментальных стальях [10].

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности и целесообразности применения нейросетевых моделей

для исследования процессов обработки материалов лезвийным инструментом, так как дают возможность существенно снизить материально-, энерго- и трудозатраты при стойкостных испытаниях, а также, используя обученную нейронную сеть, находить оптимальные параметры режимов обработки.

Литература

1. Калан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Калан. – М.: Вильямс, 2001. – 287 с.
2. Медведев, В. С. Нейронные сети. Matlab 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: Диалог МИФИ, 2002. – 496 с.
3. Проектирование научных и инженерных приложений в среде Matlab: труды Всерос. науч. конф. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 842 с.
4. Агеев, В. А. Влияние ионно-плазменной обработки на стойкость твердосплавного металлорежущего инструмента / В. А. Агеев, А. К. Вершина // Электронная обработка материалов. – 1997. – № 3–4. – С. 23–29.
5. Ageev, V. A. Effect of ion-plasma treatment on the durability of hard-alloy metal-cutting tools / V. A. Ageev, A. K. Vershina // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 1997. – № 3. – P. 23–30.
6. Лезвийный инструмент: пат. 10171 Респ. Беларусь, МПК(2006) C 23 C 28/00 / А. К. Вершина, В. А. Агеев; заявитель ГНУ ФТИ НАН Беларуси. – № а 20050679; заявл. 06.07.2005, опубл. 30.12.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.
7. Защитно-декоративное покрытие: пат. 12867 Респ. Беларусь, МПК(2009) В 32 В 15/04, С 23 С 28/00 / А. К. Вершина, В. А. Агеев, Г. Я. Беляев; заявитель ГНУ ФТИ НАН Беларуси. – № а 20071402; заявл. 20.11.2007, опубл. 30.06.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009.
8. Вишенков, С. А. Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий / С. А. Вишенков. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
9. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 448 с.
10. Повышение качества химических покрытий системы Ni-P на инструментальных сталях лазерным излучением / Г. И. Бровер [и др.] // ФизХОМ. – 1991. – № 3. – С. 90–94.

Поступила 01.04.2010