

2. Chalchat E., Pignonier E., Bontemps B. et al. Characteristics of motor unit recruitment in boys and men at maximal and submaximal force levels // *Exp. Brain Res.* 2019. Vol. 237. PP. 1289-1302.
3. Orizio C., Gobbo M., Diemont B. et al. The surface mechanomyogram as a tool to describe the influence of fatigue on biceps brachii motor unit activation strategy. Historical basis and novel evidence // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2003. Vol. 90. PP. 326-336.
4. Ce E., Longo S., Limonta E., Coratella G. et al. Peripheral fatigue: New mechanistic insights from recent technologies // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2020. Vol. 120. PP. 17-39.
5. Madeleine P., Farina D., Farina R., Arendt-Nielsen L. Upper trapezius muscle mechanomyographic and electromyographic activity in humans during low force fatiguing and non-fatiguing contractions // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. Vol. 87. PP. 327-336.
6. Kimura T., Hamada T., Watanabe T. et al. Mechanomyographic responses in human biceps brachii and soleus during sustained isometric contraction // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2004. Vol. 92. PP. 533-539.
7. Limonta E., Cè E., Gobbo M., Veicsteinas A., Orizio C., Esposito F. Motor unit activation strategy during a sustained isometric contraction of finger flexor muscles in elite climbers // *Journal of Sports Sciences.* 2016. Vol. 34. № 2. PP. 133-142.
8. Тиманин Е.М., Густов А.В., Александрова Е.А., Устимкина М.А. Виброакустические методы и аппаратно-программный комплекс для неврологической диагностики / *Фундаментальные науки – медицине. Биофизические медицинские технологии. Монография. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.И. Григорьева и Ю.А. Владимирова. – М.: МАКС Пресс, 2015. С. 194-215.*
9. Мышцы в спорте. Анатомия. Физиология. Тренировка. Реабилитация / Под ред. Й.М. Йегера, К. Крюгера; пер. с нем. под общ. ред. Д.Г. Калашникова. – М.: Практическая медицина, 2016. 408 с.
10. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // *Биофизика.* 2017. Т. 62. Вып. 1. С. 168-176.

*Евгений Михайлович Тиманин,
д-р техн. наук, ведущ. научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
г. Нижний Новгород,
e-mail: eugene@appl.sci-nnov.ru*

М.Н. Тимофеев, В.А. Кошуро, С.Я. Пичхидзе

Оптимизация параметров плазменного напыления порошков титана и гидроксиапатита

Аннотация

Рассмотрен вопрос оптимизации параметров плазменного напыления за счет использования искусственных нейронных сетей для подбора наиболее приближенных к реальным параметрам напыления порошков титана и гидроксиапатита на титановые изделия, сформированных при оптимальных значениях тока дуги 380...450 А, дистанции напыления 100...150 мм и дисперсности порошка титана 40...90 мкм. Близкие значения диапазонов наблюдаются для гидроксиапатита, в интересах обеспечения наибольшей адгезии и пористости покрытия к подложке.

Основной целью проведения экспериментов и исследований является определение взаимосвязей, позволяющих построить модель объекта и спрогнозировать поведение объекта исследований в ситуации с неизвестными условиями. Обычно при обработке экспериментальных данных используются методы математической статистики и анализа. Но при большом количестве входных параметров создание полиномиальных уравнений 6...8 порядка и выше требует затрат большого количества времени, при этом внесение изменений в уже построенную модель достаточно проблематично. Использование искусственных нейронных сетей (НС) позволяет исследователю не только изучить взаимосвязи входных векторов, но и оптимизировать построенную модель по мере накопления информации о поведении исследуемого объекта. НС удобнее классических математических методов вычислений при решении задач аппроксимации, экстраполяции с большим количеством входных параметров [1].

НС – это сети, состоящие из связанных между собой простых элементов – искусственных нейронов. Искусственный нейрон представляет собой элементарный процессор, состоящий из входного сумматора, нелинейного преобразователя и точки ветвления на выходе. Полученный сигнал служит входом для других нейронов или является выходом сети. Обычно НС состоит из входного слоя, узлы которого соответствуют компонентам входного вектора, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя, с которого считывается результирующий вектор (*рис. 1*). Такие сети называют многослойными перцептронами [2]-[4].

Работа сети данного типа может быть рассмотрена как общее непрерывное нелинейное отображение пространства входных векторов на пространство выходных векторов. Это отображение полностью задается структурой сети и набором весовых коэффициентов каждого нейрона. Известно, что множество отображений, реализуемых НС, образует плотное множество в пространстве всех непрерывных отображений [5]-[7], поэтому НС в некотором смысле являются универсальными аппроксиматорами. В большинстве случаев для НС необходимо провести обучение, т. е. настроить параметры НС за счет моделирования среды, в которую эта сеть встроена. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами.

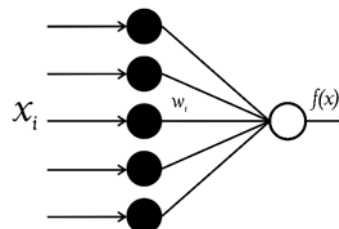


Рис. 1. Искусственный нейрон

Есть три основных метода обучения НС: с учителем, без учителя, с подкреплением. При обучении с учителем НС имеет массив данных, поступающий на входные векторы, и массив ответов на каждый входной вектор. Обучение без учителя

используется в том случае, если известны ответы – в этом случае алгоритм пытается найти признаки и зависимости. Обучение с частичным привлечением учителя представляет собой среднее между вышеописанными. Используется некоторое количество данных с ответами и большее количество данных без ответов. Алгоритм обучения с подкреплением использует систему поощрений. В настоящей статье описывается опыт применения НС для оптимизации параметров последовательного плазменного напыления порошков титана (Тi) мелкого ПТМ-1 по ТУ 14-22-57-92 при размере частиц не более 0,045 мм и гидроксиапатита (ГА) по ТУ ПНСТ 35-2015 при размере частиц 0,040...0,090 мм на титан марки ВТ1-0 [8]-[11].

Цель работы заключалась в оптимизации параметров напыления порошков Тi и ГА для формирования покрытий с заданными параметрами адгезионной прочности и пористости за счет применения НС.

Материалы и методы

В процессе исследования проводился анализ полученных образцов и с заданной погрешностью устанавливались характеристики напыления.

Морфология плазмонапыленных образцов Тi и ГА исследовалась на образцах из титана марки ВТ1-0, представляющих собой цилиндры диаметром 6,5 мм и высотой 1,5 мм; адгезию напыленных образцов исследовали на плоских образцах титана размером 10 × 30 × 2 мм.

Перед напылением ГА проводилась абразивно-струйная обработка поверхности образцов порошком электрокорунда «Белэкт» № 25 (ТУ 9391-094-45814830-2003) дисперсностью 150...350 мкм при давлении 0,2...0,5 МПа в течение 5 мин. Очистка от технологических загрязнений проводилась в водных растворах ПАВ и этилового спирта с применением УЗ-ванны «УЗУМИ-2».

Процесс плазменного порошкового напыления проводился на установке УПН-28. На поверхности образцов формировались слоистые покрытия системы Тi-ГА. Дистанция напыления составляла 50...180 мм, дисперсность порошкового материала – 30...100 мкм, сила тока дуги – 300...550 А.

Пористость покрытий определялась согласно известной методике к анализатору изображений микроструктур АГПМ-6М ФУЛК 401163.001-01 программой «Микрошлиф» (рис. 2). Адгезионно-когезионную прочность плазмонапыленного покрытия определяли методом сдвига на испытательной универсальной машине ИР 5082-100. Образцы склеивали напыленными поверхностями при помощи эпоксидного клея «Henkel Loctite EA 3425» (выдерживает удельные нагрузки на разрыв до 40 МПа) и оставляли под грузом до полного высыхания.

Для обработки экспериментальных результатов плазменного напыления и создания нейронной сети применяли MATLAB 2012b. Использовались две выборки: основная и тестовая. Основная выборка имела 200 значений, тестовая – 20 значений.

Результаты исследования

Отдельный эксперимент по определению пористости покрытий представлен на рис. 2. Результаты практического исследования плазменного напыления представлены на рис. 3.

Анализ зависимостей поверхностной пористости плазменных титановых и гидроксиапатитовых покрытий, напыленных на основу имплантата из титана тока дуги плазматрона, дисперсности порошка и дистанции напыления показывает нелинейное влияние на адгезию покрытий. Результаты исследования показали, что изменение тока дуги при напылении в меньшей степени влияет на адгезию, чем дистанция и дисперсность порошка. Максимального значения для титанового покрытия адгезия достигает при $I = 450...550$ А для титана и $350...450$ А для гидроксиапатита, причем дальнейшее увеличение тока дуги не оказывает на нее сильного влияния.

При увеличении тока возрастают температура частиц и степень их прогрева, поэтому увеличивается площадь контакта частиц с подложкой вследствие их лучшего растекания – в итоге адгезия увеличивается. Из графиков рис. 3 видно, что на малых дистанциях адгезия приближается к пониженному уровню до 14,0 МПа для Тi и до 8,7 МПа для ГА. С увеличением дистанции напыления частицы постепенногреваются и

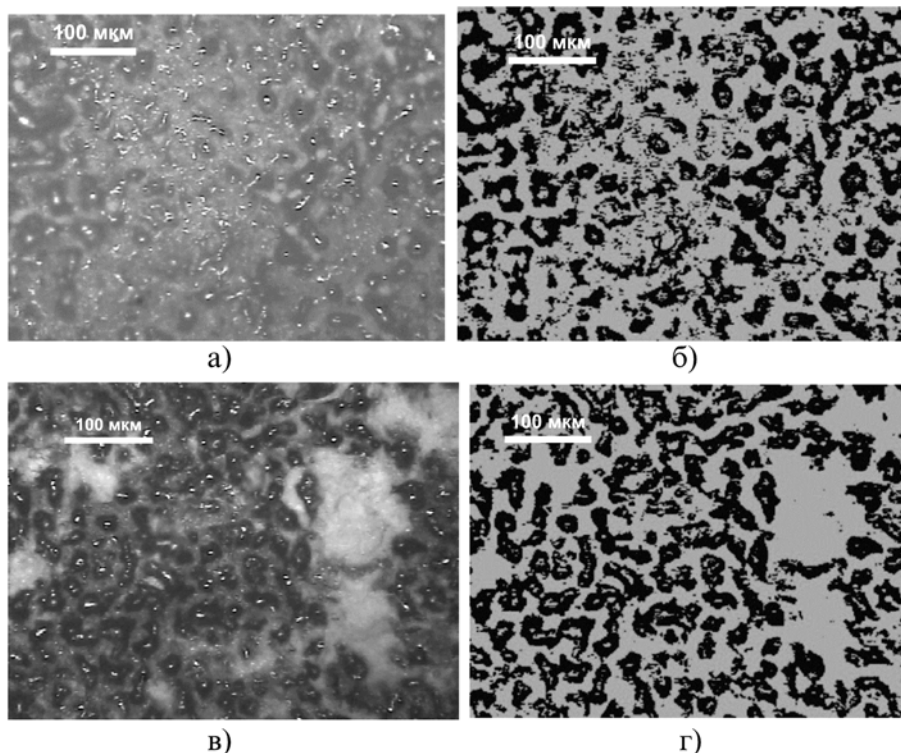


Рис. 2. Пример плазменного порошкового напыления Тi (а) и ГА (в): пористость полученных покрытий порошка титана 38 % (б) и ГА 40 % (г), ширина кадра 510 мкм, где темные и светлые поля на бинаризованных изображениях – это подложка и напыление соответственно

ускоряются. Повышается кинетическая энергия частицы, и возрастают ударное и напорное давления. Высокая адгезия порядка 23...24 МПа для Тi и 10...11,1 МПа для ГА создается при дистанциях 120...175 и 80...160 мм соответственно. С дальнейшим увеличением дистанции адгезия снижается. Это объясняется выходом из зоны максимального воздействия плазменной струи и в результате малой скоростью удара частиц о поверхность основы, а также значительным охлаждением частиц и снижением их скорости.

Графическая зависимость адгезии от дисперсности напыляемого порошка носит экстремальный характер, что указывает на существующие пределы размеров частиц для Тi 40 – 95 мкм, для ГА 40 – 100 мкм. Увеличение размеров частиц свыше 100 мкм ослабляет адгезию вследствие недостаточного прогрева распыляемых частиц в плазменной струе и малой деформации при ударе. Частицы менее 50 мкм обладают невысокой кинетической энергией, поэтому мало деформируются при ударе о подложку, напорное давление в контакте невелико, и в итоге мала прочность сцепления с подложкой.

При напылении мелких частиц до 40 мкм они сильно прогреваются, однако обладают невысокой кинетической энергией, поэтому мало деформируются при ударе о подложку, напорное давление в контакте невелико, и в итоге мала прочность сцепления с подложкой. При увеличении частиц возрастают их масса и силы инерции, поэтому частицы меньше тормозятся и с

большой скоростью соударяются с подложкой. Это приводит к сильной деформации, увеличению площади контакта, возрастанию напорного давления. Увеличение размеров частиц свыше 100 мкм приводит к недостаточному прогреву распыляемых частиц в плазменной струе и их подплавлению.

В заключение отметим, что адгезия достигает наибольшего для данных условий напыления значений до 24,0 МПа для Тi и до 11,1 МПа для ГА.

Была обучена и протестирована нейронная сеть заданной архитектуры. Тестирование проводилось на выборке, составленной из параметров напыления (дистанция напыления, дисперсность порошка ГА, сила тока дуги), не участвующих в обучении нейронной сети. Погрешность определения диагноза на тестирующих данных составила $\approx 10\%$.

Для решения поставленной задачи использовался многослойный персептрон, имеющий входной слой с тремя векторами (ток дуги, дистанция, дисперсность), на выходе выдавались значения пористости и адгезии. Для входного слоя использовалось тридцать нейронов с погрешностью 10%. Обучение сети проводилось алгоритмом Левенберга-Марквардта. При обучении входная выборка была разделена на три группы: Train (70%), Test (20%) и Validation (10%). Цель обучения НС – получение значений входных векторов (ток дуги, дистанция и дисперсность) по желаемым значениям поверхностной пористости и адгезии.

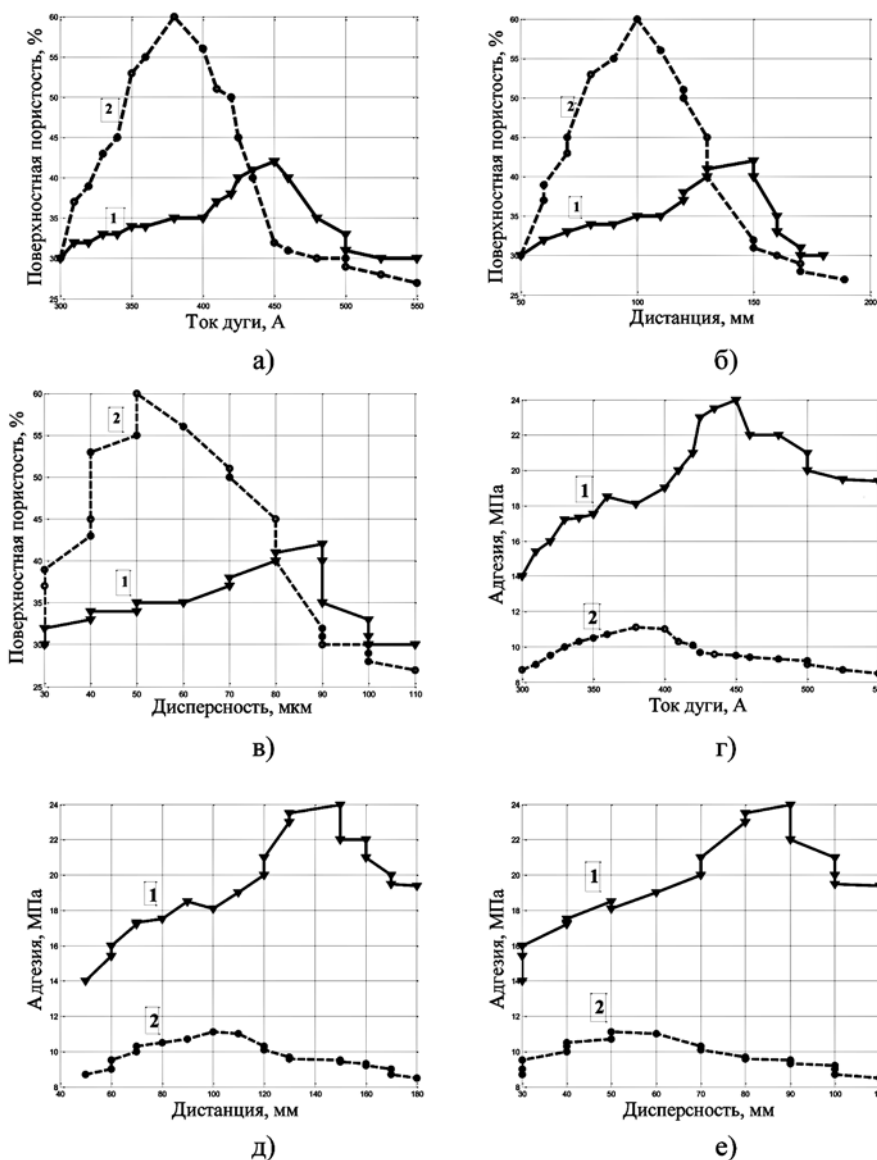


Рис. 3. Зависимость поверхностной пористости и адгезии Тi (1) и ГА (2) от тока дуги (а), (г), дистанции напыления (б), (д) и дисперсности порошка (в), (е)

В результате исследования получена обученная НС с высокой скоростью работы (рис. 4). Обучение производилось в течение 4 эпох, при этом лучший результат был достигнут на третьей эпохе с производительностью $7,9042 \cdot 10^{-4}$ (рис. 5).

Выводы

Согласно полученным расчетным данным, рациональным сочетанием адгезионной прочности и пористости характеризуются покрытия, сформированные при токе дуги 380...450 А, дистанции напыления 100...150 мм и дисперсности титанового порошка 40...90 мкм. Близкие значения диапазонов наблюдаются и для ГА. Обученная НС продемонстрировала высокую скорость работы. Полученная программа используется следующим образом: проводится ввод исходных данных, и НС-модель выдает прогноз значений пористости и адгезии.

Следовательно, моделирование НС позволяет достаточно достоверно обработать массив экспериментальных данных и выдать прогнозируемые значения по адгезии и пористости.

Построенная модель показала возможность экстраполяции данных для подбора оптимальных параметров напыления ГА на титановые изделия для формирования покрытий с рациональным сочетанием адгезионной прочности и пористости.

Список литературы:

1. *Ivannikov A. Y., Kalita V. I., Komlev D. I., Radyuk A. A., Alpatov A. V., Zakharov I. N., Grigoriev S. N., Prozhega M. V.* The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma-sprayed Fe-30Cr coating // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28. PP. 883-892.
2. *Bishop C. M.* Neural networks for pattern recognition. – Oxford: Clarendone Press, 1995. 504 p.
3. *Hertz J., Krogh A., Palmer R. G.* Introduction to the theory of neural computation / *Lecture Notes Volume I the Santa FE Institute studies in the sciences of complexity*, 1991. 352 p.
4. *Kolmogorov A. N.* On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition / *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 114:5, 1957. PP. 953-956.
5. *Specher D. A.* On the structure of continuous functions of several variables / *Transactions of the American Mathematical Society*, 1965. PP. 340-355.

6. *Cybenko G.* Approximation by superpositions of a sigmoidal function // *Mathematics of Control, Signals and Systems*. 1989. Vol. 2. PP. 303-314.
7. *Funahashi K.* On the approximate realization of continuous mappings by neural networks // *Neural Networks*. 1989. Vol. 2. PP. 183-192.
8. *Баринев С. М., Комлев В. С.* Биокерамика на основе фосфатов кальция. – М.: Наука, 2005. 204 с.
9. *Данильченко С. Н.* Структура и свойства апатитов кальция с точки зрения биоминералогии и биоматериаловедения (обзор) // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка*. 2007. № 2. С. 33-59.
10. *Fomin A., Fomina M., Koshuro V., Rodionov I., Zakharevich A., Skaptsov A.* Structure and mechanical properties of hydroxyapatite coatings produced on titanium using plasma spraying with induction preheating // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. № 14. PP. 11189-11196.
11. *Fomina M., Koshuro V., Papshev V., Rodionov I., Fomin A.* Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying // *Data in Brief*. 2018. Vol. 20. PP. 1409-1414.

Максим Николаевич Тимофеев,
инженер-электроник,
управление информатизации
и телекоммуникаций,
Владимир Александрович Кошуро,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра «Сварка и металлургия»,
Сергей Яковлевич Пичхидзе,
д-р техн. наук, профессор,
ст. научный сотрудник,
кафедра «Материаловедение
и биомедицинская инженерия»,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю. А.»,
г. Саратов,
e-mail: rendom@sstu.ru

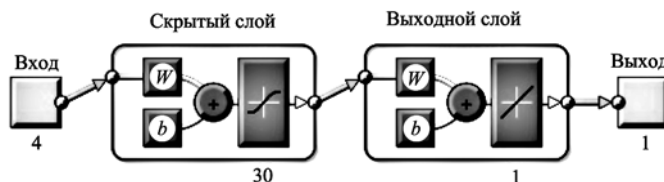


Рис. 4. Архитектура искусственной нейронной сети

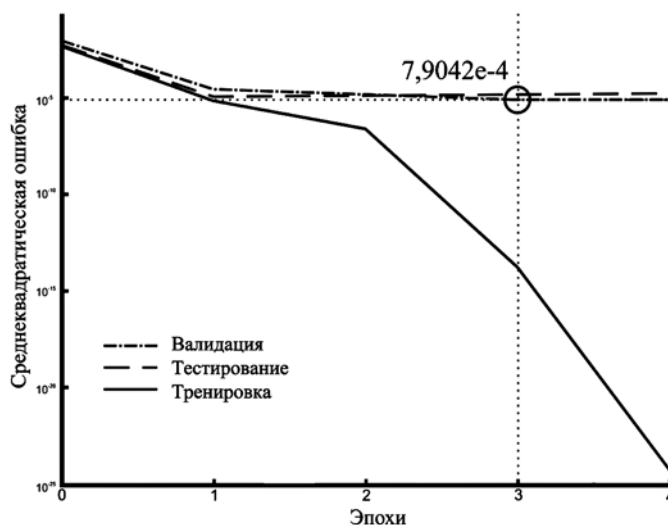


Рис. 5. Производительность нейронной сети