

УДК 621.452.3.03:621.787:539.43:004.89.032.26

doi: 10.32620/aktt.2019.8.13

И. В. БИБЛИК

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Разработан подход для прогнозирования усталостной прочности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) на стадии их изготовления, основанный на использовании нейронных сетей. Нейросетевая модель, реализованная в среде программирования Delphi, состоит из входного слоя, содержащего четыре элемента, одного скрытого слоя с четырьмя нейронами и выходного слоя с одним элементом. Выходным параметром нейронной сети является усталостную прочность, а входные параметры определяются технологическим процессом изготовления деталей. Это – шероховатость поверхности, степень и глубина наклепа поверхностного слоя, остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое. В качестве активационной функции нейронной сети используется сигмоидальная функция. В качестве обучающего алгоритма нейронной сети выбран алгоритм обратного распространения ошибки. Обучение нейронной сети происходит по заранее подготовленной обучающей выборке, в качестве которой используются экспериментальные и литературные данные. Значения усталостной прочности деталей ГТД определялись для постоянной базы и условий испытаний. Средние квадратичные ошибки прогноза, вычисляемые нейронной сетью для обучающей и тестовой выборки, составляют 0,021 и 0,034 соответственно. Определены диапазоны изменения входных параметров, на которых нейросетевая модель корректно выполняет прогнозирование усталостной прочности. Установлены соотношения между значимостью каждого из входных параметров сети для оценки комплексного влияния параметров поверхностного слоя на сопротивление усталости. Показано, что наибольшее влияние на повышение предела выносливости деталей после технологической обработки оказывают остаточные напряжения сжатия и степень поверхностного упрочнения. Рассмотрена возможность и приведены примеры решения обратной задачи, когда по известному значению усталостной прочности проводится поиск значений входных параметров нейронной сети, приводящих к появлению имеющегося выходного. Разработанный подход может позволить еще на этапах технологической подготовки производства обеспечить необходимое значение усталостной прочности, минимизировать объем испытаний и осуществить выбор оптимальных режимов обработки деталей ГТД для наиболее эффективного упрочнения.

Ключевые слова: усталостная прочность; поверхностное упрочнение; остаточные напряжения сжатия; наклеп; шероховатость поверхности; нейронные сети.

1. Введение и постановка задачи

В настоящее время при изготовлении деталей газотурбинных двигателей (ГТД) широкое применение получили методы пластического деформирования и механической обработки, а также комплексные технологии на финишных операциях технологического процесса. В зависимости от материала детали и условий эксплуатации назначаются режимы обработки, позволяющие достигать необходимых значений усталостной прочности в достаточно широком диапазоне исходных состояний поверхности.

С этой целью многими исследователями осуществляются попытки управления процессом изготовления деталей с помощью обратной связи между параметрами качества поверхностного слоя и режи-

мами обработки [1]. Известно большое количество научных исследований, которые подтверждают факт влияния параметров качества поверхностного слоя деталей на их эксплуатационные свойства [2, 3]. Усталостная прочность деталей существенно зависит не только от величины шероховатости, но и, в значительной мере, от степени наклепа и остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое деталей. Однако, на данный момент отсутствует единое мнение о степени влияния каждого из перечисленных параметров качества поверхностного слоя на предел выносливости упрочненного материала.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния деформационных (остаточных напряжений сжатия, глубины и степени наклепа) и геометрических (шероховатости поверхности) параметров, сформировавшихся в поверхностном слое деталей ГТД после технологических операций, на их усталостную прочность.

Каждый из параметров поверхностного слоя, действуя в совокупности с остальными факторами, имеет свое самостоятельное влияние на изменение характеристик усталости. Знание закономерностей раздельного и комплексного влияния параметров поверхностного слоя позволяет использовать высокоэффективные методы обработки, обеспечивающие значительный прирост усталостной прочности деталей ГТД за счет технологического обеспечения оптимального уровня каждого из основных параметров поверхностного слоя деталей при их изготовлении.

Трудности, связанные с описанием сложных зависимостей, при формировании множества показателей качества при изготовлении деталей могут быть преодолены на основе применения современных информационных технологий. В последние годы широкое распространение получило новое направление в области создания моделей, прогнозирующих свойства материалов на основе искусственных нейронных сетей, которые зарекомендовали себя как эффективный метод аппроксимации сложных нелинейных и неявных зависимостей. Одно из основных преимуществ нейронных сетей заключается в том, что построение нейросетевой модели происходит адаптивно во время обучения, без участия оператора. При этом нейронной сети предъявляются примеры из базы данных, и она сама подстраивается под эти данные.

Целью настоящей работы является обоснование целесообразности использования нейросетевых моделей для оценки влияния качества поверхностного слоя на предел выносливости деталей ГТД.

2. Описание нейросетевой модели

Для решения задачи прогнозирования усталостной прочности деталей ГТД после технологических операций предлагается реализовать модель нейронной сети, которая состоит из входного слоя, содержащего четыре элемента, одного скрытого слоя с четырьмя нейронами и выходного слоя с одним элементом.

В работе [4] нейросетевая методология уже применялась для прогнозирования коэффициента упрочнения деталей ГТД с входными параметрами, определяющими особенности распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного поверхностного слоя. В настоящей работе в качестве входных параметров нейронной сети использовались параметры, определяемые технологией изготовления деталей ГТД:

R_a – шероховатость поверхности;
 h_s – глубина упрочнения;

$\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое;

ΔH – степень упрочнения.

С помощью разработанной нейросетевой модели проводилось прогнозирование усталостной прочности поверхностно упрочненных деталей ГТД, изготовленных из хромоникелевых и титановых сплавов. Для каждого из входных параметров сети выбирались интервалы возможных значений в соответствии с табл. 1. Выходной параметр (усталостная прочность) определялся для постоянной базы ($5 \cdot 10^6$ циклов) и условий испытаний (симметричный цикл нагружения изгибом при температуре 20 °С).

Таблица 1

Диапазоны значений входных параметров сети

№ п/п	Обозначение параметра	Размерность	Диапазон значений
1	R_a	мкм	0,2...0,4
2	h_s	мкм	20...80
3	$\sigma_{ост}$	МПа	-50...-600
4	ΔH	%	0...25

Нейросетевая модель реализована в среде программирования *Delphi*. В качестве активационной функции нейронной сети используется сигмоидальная функция. Обучение нейронной сети происходило по заранее подготовленной обучающей выборке, в качестве которой использовались экспериментальные и литературные данные. В качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на алгоритме минимизации среднеквадратической ошибки.

На рис. 1 приведен фрагмент экрана вывода результатов работы нейронной сети (линия – линия регрессии, точки – выходные значения). Средняя квадратичная ошибка прогноза, вычисляемого нейронной сетью для обучающей выборки составляет 0,021, а для тестовой выборки – 0,034. Весовые коэффициенты сети после ее обучения составляли:

для R_a – -2,255; для h_s – 0,255;

для $\sigma_{ост}$ – 5,5; для ΔH – 2,2.

Из сравнения весовых коэффициентов входных переменных нейронной сети следует, что наибольшее влияние на повышение предела выносливости деталей после технологической обработки оказывают остаточные напряжения сжатия и степень поверхностного упрочнения. Анализ сведений о параметрах поверхностного слоя после различных видов обработки и данные о пределах выносливости деталей ГТД, также свидетельствует о том, что при одинаковой шероховатости поверхности вклад остаточных напряжений сжатия в повышение предела выносливости оказывается выше [5].

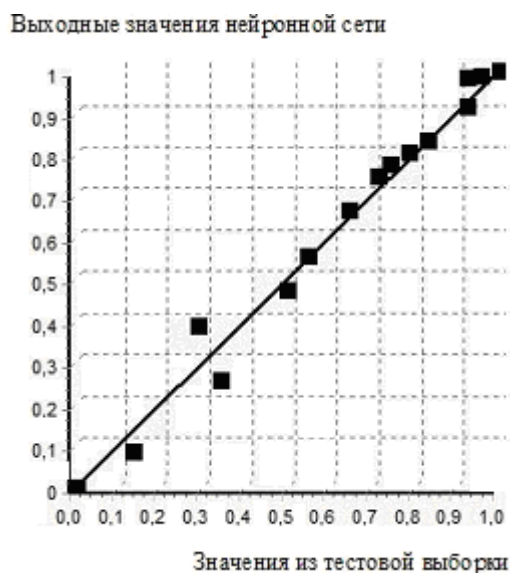


Рис. 1. Оценка точности аппроксимации для тестовой выборки

С помощью разработанной нейронной сети может быть решена и обратная задача, когда по известным значениям усталостной прочности проводится поиск входных параметров (шероховатости поверхности, степени поверхностного наклепа и др.), приводящих к появлению имеющихся выходных. На рис. 2...4 показаны зависимости между значениями входных параметров нейронной сети из тестовой выборки (эталоны) и соответствующими ожидаемыми значениями, полученными нейронной сетью по известным выходным значениям усталостной прочности. Значения коэффициентов корреляции между ожидаемыми значениями входных параметров и данными из тестовой выборки находятся в интервале от 0,890 для R_a до 0,984 для $\sigma_{ост}$.

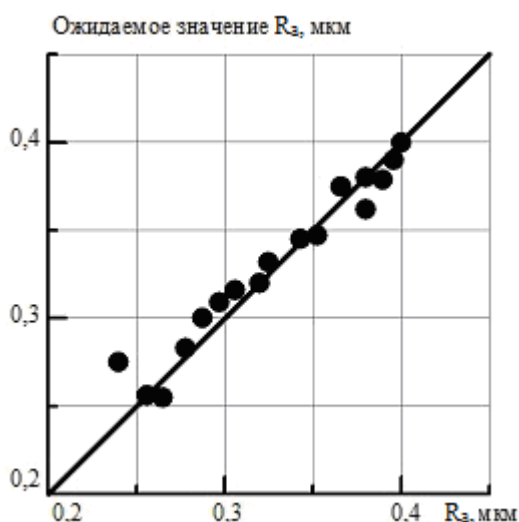


Рис. 2. График линейной регрессии между ожидаемым значением шероховатости поверхности и эталоном

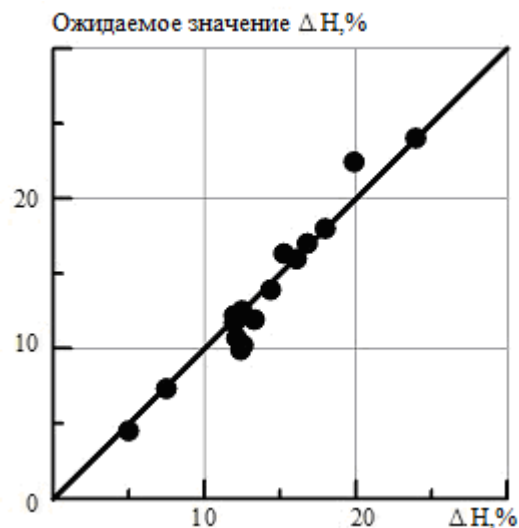


Рис. 3. График линейной регрессии между ожидаемым значением степени поверхностного наклепа и эталоном

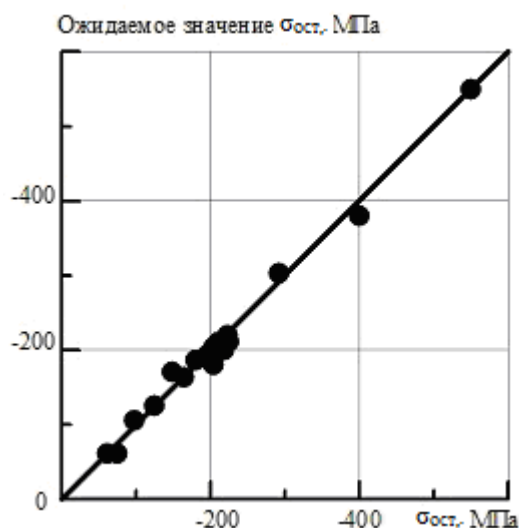


Рис. 4. График линейной регрессии между ожидаемым значением остаточных напряжений сжатия и эталоном

Таким образом, полученные результаты позволяют не только установить степень влияния основных параметров качества поверхностного слоя на усталостную прочность деталей ГТД при их технологической обработке, но и определять в случае необходимости значения каждого из входных переменных нейронной сети, обеспечивающих заданное значение предела выносливости.

Выводы

Установлена принципиальная возможность использования технологии самообучающихся нейрон-

ных сетей для прогнозирования усталостной прочности деталей ГТД после технологических операций.

Предложенная нейросетевая модель обеспечивает хорошую точность аппроксимации как для обучающей, так и для тестовой выборки данных. Низкие значения ошибок построенной модели позволяют использовать результаты расчетов для прогнозирования значений усталостной прочности деталей ГТД уже на стадии их изготовления.

Применение нейросетевой методологии для оценки комплексного влияния параметров поверхностного слоя на сопротивление усталости позволило установить соотношения между значимостью каждого из них без проведения длительных усталостных испытаний.

Возможность решения обратной задачи с помощью нейросетевого подхода может быть использована для оптимизации технологических процессов по критерию максимального предела выносливости с целью реализации резервов упрочнения материала изделий.

Разработанный подход может рассматриваться как переход от обеспечения характеристик поверхностного слоя к обеспечению требуемых эксплуатационных свойств, в частности сопротивления усталости деталей ГТД.

Литература

1. Исследование влияния остаточных напряжений на усталостную прочность образцов их титановых и никелевых сплавов [Текст] / В. А. Горелов, А. С. Кудров, Н. С. Меркулова и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 5. – С. 47-51.

2. Сахнюк, Н. В. Влияние параметров качества поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессоров ГТД нового поколения [Текст] / Н. В. Сахнюк, В. В. Цыганов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 117/2011. – С. 153-156.

3. Качан, А. Я. Математическое моделирование влияния технологической наследственности финишных методов обработки на предел выносли-

вости деталей ГТД [Текст] / А. Я. Качан, С. А. Уланов // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 81-86.

4. Библик, И. В. Прогнозирование усталостной прочности поверхностно упрочненных материалов на основе нейросетевого моделирования [Текст] / И. В. Библик // Вестник двигателестроения. – 2018. – № 2. – С. 82 – 86.

5. Петухов, А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А. Н. Петухов. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с.

References

1. Gorelov, V. A., Kudrov, A. S., Merkulova, N. S., Yakovlev, M. G. Issledovanie vliyaniya ostatochnykh napryazhenii na ustalostnyuyu prochnost' obraztsov ikh titanovykh i nikelovykh spлавov [Investigation of the effect of residual stresses on the fatigue strength of titanium and nickel alloys samples]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 5, pp. 47-51.

2. Sakhnyuk, N. V., Tsyganov, V. V. Vliyanie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya na vynoslivoost' lopatok kompressorov GTD novogo pokoleniya [The influence of quality parameters of the surface layer on the endurance of a new generation GTE compressor blades]. *Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. [Bulletin of the SevSTU: col. scient. papers]*, 2011, vol. 117/2011, pp. 153-156.

3. Качан, А. Я., Уланов, С. А. Математическое моделирование влияния технологической наследственности финишных методов обработки на предел выносливости деталей ГТД [Mathematical modeling of the influence of technological heredity finishing methods of processing on the endurance limit of GTE parts]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 81-86.

4. Biblik, I. V. Prognozirovanie ustalostnoi prochnosti poverkhnostno uprochnennykh materialov na osnove neirosetevogo modelirovaniya [Prediction of fatigue strength of surface-hardened materials based on neural network modeling]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2018, no. 2, pp. 82-86.

5. Petukhov, A. N. Soprotivlenie ustalosti detalei GTD [Fatigue Resistance of GTE Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 240 p.

Поступила в редакцию 01.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД

І. В. Біблік

Розроблено підхід для прогнозування втомної міцності деталей газотурбінних двигунів (ГТД) на стадії їх виготовлення, заснований на використанні нейронних мереж. Нейромережева модель, що реалізована в середовищі програмування *Delphi*, складається із вхідного шару, що містить чотири елементи, одного прихованого шару з чотирма нейронами і вихідного шару з одним елементом. Вихідним параметром нейронної мережі є втомна міцність, а вхідні параметри визначаються технологічним процесом виготовлення деталей. Це – шорсткість поверхні, ступінь і глибина наклепу поверхневого шару, залишкові напруження стиску в

поверхневому шарі. Активаційною функцією нейронної мережі є сигмоїдальна функція. В якості навчаючого алгоритму нейронної мережі обраний алгоритм зворотного поширення помилки. Навчання нейронної мережі відбувається за заздалегідь підготовленою навчаючою вибіркою, в якості якої використовуються експериментальні та літературні дані. Значення втомної міцності деталей ГТД визначалися для постійної бази і умов випробувань. Середні квадратичні помилки прогнозу, що обчислюються нейронною мережею для навчаючої і тестової вибірки, становлять 0,021 і 0,034 відповідно. Визначено діапазони зміни вхідних параметрів, на яких нейромережева модель коректно виконує прогнозування втомної міцності. Встановлено співвідношення між значимістю кожного з вхідних параметрів мережі для оцінки комплексного впливу параметрів поверхневого шару на опір втомі. Показано, що найбільший вплив на підвищення межі витривалості деталей після технологічної обробки надають залишкові напруження стиску і ступінь поверхневого зміцнення. Розглянуто можливість і наведені приклади розв'язання оберненої задачі, коли за відомим значенням втомної міцності проводиться пошук значень вхідних параметрів нейронної мережі, що призводять до появи наявного вихідного. Розроблений підхід може дозволити ще на етапах технологічної підготовки виробництва забезпечити необхідне значення втомної міцності, мінімізувати обсяг випробувань і здійснити вибір оптимальних режимів обробки деталей ГТД для найбільш ефективного зміцнення.

Ключові слова: втомна міцність; поверхнєве зміцнення; залишкові напруження стиску; наклеп; шорсткість поверхні; нейронні мережі.

NEURAL NETWORK MODEL FOR EVALUATING THE INFLUENCE OF SURFACE LAYER QUALITY ON THE FATIGUE STRENGTH OF GTE DETAILS

I. V. Biblik

An approach based on using the neural networks has been developed for predicting the fatigue strength of gas turbine engine (GTE) parts at the manufacturing stage. The neural network model implemented in the Delphi programming environment consists of an input layer containing four elements, one hidden layer with four neurons, and an output layer with one element. The output parameter of the neural network is fatigue strength, and the input parameters are determined by the technological process of manufacturing parts. These are the surface roughness, the degree, and depth of strain hardening and the residual compressive stresses in the surface layer. The sigmoid function is used as the activation function of the neural network. Back propagation error algorithm is developed to network's training. The neural network is trained according to a previously prepared training and test data, including experimental and literary data. The fatigue strength values of GTE parts were determined for a constant base and test conditions. The mean squared errors calculated by the neural network for the training and test samples are 0.021 and 0.034, respectively. The input parameter ranges, on which the neural network model correctly performs prediction of fatigue strength, were determined. The relationships between the significance of each of the network input parameters for assessing the complex effect of surface layer parameters on fatigue strength are established. It is shown that residual compressive stresses and the degree of surface hardening have the greatest influence on the increase in the endurance limit of parts after processing. The possibility is considered and examples of the solution of the inverse problem are given, when by known values of the fatigue strength the values of the input parameters of the neural network, leading to the appearance of the available output, are searched. The developed approach may allow even at the stages of technological preparation of production to provide the required value of fatigue strength, to minimize the amount of testing and make the choice of optimal processing modes for GTE parts for the most effective hardening.

Keywords: fatigue strength; surface hardening; residual compressive stresses; strain hardening; surface roughness; neural network.

Библик Ирина Валентиновна – главный инженер-исследователь отдела надежности и динамической прочности, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

Biblik Irina Valentinovna – chief engineer-researcher of the department of reliability and dynamic strength, A. N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-8650-1134, Scopus Author ID: 6504273980, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=XcrvLucAAAAJ&hl=ru>