

УДК 539.43

А. М. ЩИПАЧЕВ, Р. Р. ХАКИМОВА, Л. Р. ЧЕРНЯХОВСКАЯ

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Показана эффективность применения нейро-нечетких сетей для прогнозирования усталостной долговечности металлов с учетом влияния технологии поверхностной обработки – на примере стали 30ХГСНА после операций шлифования и поверхностно-пластического деформирования. Показано, что использование таких сетей может быть альтернативой аналогичным эмпирическим зависимостям. *Усталостная долговечность; нейро-нечеткие сети*

Средства искусственного интеллекта в последние годы бурно развиваются, расширяя сферу своего приложения. В технической сфере это искусственно создаваемые сложные технические объекты (космические корабли, морские суда, самолеты, электростанции и т. п.), а также исследование комплексных проблем, таких как качество изделий машиностроения, долговечность, надежность и др. Проблема прогнозирования характеристик усталостной прочности изделий, особенно усталостной долговечности, относится к таким комплексным, сложным проблемам.

Нейро-нечеткое моделирование основано на синтезе моделирования с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и нечеткого моделирования. Применение ИНС является либо альтернативным, либо единственно возможным методом решения сложной системной проблемы. Известны сферы применения ИНС – распознавание образов, классификация, категоризация, прогнозирование [1].

Применяя ИНС, мы предполагаем, что изучаемый объект или проблема – это некий черный ящик. Подавая на входы параметры, образующие множество  $X$ , получаем значение выходного параметра  $y$ . Обучая ИНС, т. е. подстраивая веса элементов сети на основе обучающей выборки, добиваемся, чтобы сеть давала значение  $y$  с минимальной погрешностью в сравнении со значением из выборки.

Задачи прогнозирования успешно решаются ИНС – в литературе приводятся примеры применения ИНС для прогнозирования курсов акций, спроса, потребления на основе времен-

ных рядов. В основном это задачи из области экономики, финансов.

В случае, когда для прогнозирования необходимо учитывать разнородную информацию, в том числе и нечеткую, ИНС в «чистом виде» применять нельзя. В этих случаях применяются нейро-нечеткие сети (ННС).

Большим преимуществом ННС является то, то возможно использовать так называемую нечеткую информацию. Это могут быть мнения экспертов, субъективные пожелания, суждения такого типа, как «сильный», «слабый», «не очень много», «скорее да, чем нет», «большая долговечность», «не очень высокая надежность» и т. п., то есть эта информация «размытая», нечеткая. Если в детерминированных («четких») вычислениях такая информация просто отбрасывалась, то, используя подходы теории нечетких множеств, ее можно определенным образом учитывать.

Входящие в гибридную сеть переменные фазсифицируются – т. е. задается вид функции принадлежности (треугольный, сигмоид, гауссиан и т. п.) и конкретное ее значение, соответствующее входящей переменной. Далее идут операции над нечеткими множествами, формируется нечеткий вывод, затем в результате дефазсификации получаем четкий вывод – числовое значение выходной переменной [2].

В процессе обучения такая гибридная сеть подстраивает веса входящих нейронов (методом обратного распространения ошибки) и обучается наилучшим образом отвечать имеющейся связи между входными и выходными переменными. Другими словами, создается некая математическая модель процесса или явления.

При этом данная модель зачастую адекватнее сложной и громоздкой аналитической модели, создается проще и быстрее. При изменении неких констант она легко переобучается.

На усталостную долговечность влияют разнородные факторы: внешнее переменное напряженное состояние, частота нагружения, асимметрия цикла, структурное состояние металла, состояние поверхностных слоев, покрытия, концентрация напряжений, форма детали (образца) и т. п. Усталостная долговечность образцов по результатам испытаний на усталость имеет достаточно большой разброс значений – на порядок и более.

Публикаций, где рассматривались бы аналитические зависимости для определения усталостной долговечности, намного меньше, чем публикаций по прогнозированию предела выносливости. Это может быть объяснено тем, что, в отличие от предела выносливости, долговечность зависит от большего числа факторов, вследствие этого аналитические зависимости для ее определения получаются громоздкими. Они могут включать 20–30 параметров (переменных), которые надо как-то определить (что само по себе представляет трудоемкую задачу). Но поскольку каждая переменная имеет некоторую погрешность, то на выходе имеем неприемлемую погрешность расчета. К тому же такая аналитическая модель достаточно сложна в разработке.

Возможность применения ННС для прогнозирования усталостной долговечности в многоциклового области была нами показана на примере образцов из стали 30ХГСНА, которые были обработаны пневмодинамическим упрочнением после шлифования [3]. Распределение твердости HV10 и осевых остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образца показано на диаграмме – рис. 1. Путем испытаний на машине МУИ-6000 при напряжении 920 МПа (чистый изгиб с вращением, частота 6000 об/мин) определена усталостная долговечность, доверительный интервал ее логарифма составил  $5,41 < \lg N < 6,59$  циклов при доверительной вероятности 95%. На диаграмме приведены распределения HV10 по глубине поверхностного слоя  $x$ .

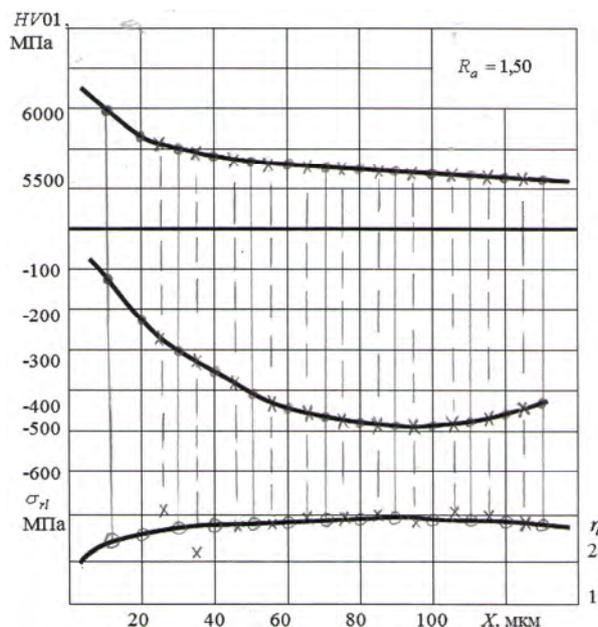
Также приведено распределение по глубине поверхностного слоя  $x$  величины  $\eta$  – отношения расчетной долговечности рассматриваемого образца к долговечности «эталонного образца» без наклепа и остаточных напряжений (по зависимостям автора [3]). Значение  $\eta$  на глубине от поверхности  $x$  вычислялось при соответствующих этому  $x$  значениях твердости и оста-

точных напряжений. Влияние шероховатости учитывалось при определении  $\eta$  на поверхности. Далее, на основе представлений о «наиболее опасном подслое», была вычислена общая усталостная долговечность образца.

Гипотеза «наиболее опасного поверхностного подслоя» заключается в следующем [3]. Разобьем поверхностный слой детали условно на ряд достаточно тонких подслоев. В каждом подслое можно вычислить значение усталостной долговечности по имеющимся данным по твердости и остаточным напряжениям в рассматриваемом подслое. Таким образом можно получить распределение усталостной долговечности по глубине поверхностного слоя. Минимальное значение распределения усталостной долговечности будет соответствовать усталостной долговечности всей детали.

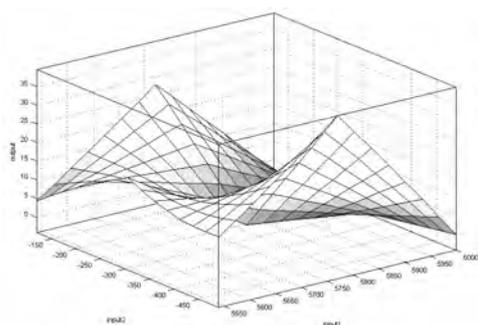
В связи с этим, в рассматриваемом случае ННС могут быть использованы для определения распределения усталостной долговечности по глубине поверхностного слоя. Далее необходимо рассматривать и анализировать вид распределения усталостной долговечности по глубине поверхностного слоя для выбора подслоя, соответствующего общей усталостной долговечности.

Разработка ННС и работа с ней проводились в математическом пакете MATLAB 7 в редакторе Anfisedit, который реализует систему нечеткого вывода типа Сугено в виде пяти-слойной нейронной сети прямого распространения сигнала. Входными переменными приняли действующие на глубине  $x$  амплитудные значения цикла, остаточные напряжения и твердость HV10, а выходной переменной приняли относительную усталостную долговечность  $\eta$ . Рассмотрели изменение этих параметров с шагом 10 мкм: на этом массиве произвели обучение ННС. Тестирующая выборка была получена по значениям и HV10, полученным с диаграммы рис. 1 через шаг 10 мкм (сдвиг относительно обучающей выборки 5 мкм). Результаты прогнозирования  $\eta$  нанесены на диаграмму рис. 1. Видно, что расчетные значения, полученные с использованием ННС, практически лежат на кривой распределения  $\eta$ . Это свидетельствует о том, что применение ННС дает такие же результаты, как и расчет по аналитическим зависимостям автора и, кроме того, проще и быстрее в реализации. На рис. 2 приведена поверхность «входы-выход», где входами являются влияющие факторы – твердость и осевые остаточные напряжения, выходом – усталостная долговечность (остальные факторы приняли фиксированные значения).



**Рис. 1.** Распределение микротвердости, осевых остаточных напряжений, относительной усталостной долговечности по глубине поверхностного слоя стали 30ХГСНА после операции пневмодинамического упрочнения: ● – входные данные обучающей выборки, ○ – выходные данные обучающей выборки, x – входные и выходные данные проверочной выборки

Анализ адекватности приведенной нечеткой модели показал, что влияние изменения значений входных факторов: остаточных напряжений  $\sigma_{r1}$  и твердости HV10 на выходную переменную – усталостную долговечность соответствует представлениям экспертов о рассматриваемых процессах.



**Рис. 2.** Трехмерная диаграмма, показывающая зависимость усталостной долговечности (output) от твердости (input1) и остаточных напряжений (input2)

## ВЫВОДЫ

1. Показана эффективность применения ННС для прогнозирования усталостной долговечности металлов с учетом влияния технологии поверхностной обработки – на примере стали 30ХГСНА.

2. Можно предположить, что ННС будут эффективны для определения и других характеристик прочности и пластичности материала.

3. Разработка, обучение и применение ННС для целей прогнозирования проще и быстрее, чем создание расчетных зависимостей (эмпирических, феноменологических, полуэмпирических) и их применение.

4. Для прогнозирования с применением ННС возможно использование нечеткой информации, которая не учитывается при применении аналитических расчетных зависимостей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 452 с.
2. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: Солон-Пресс, 2006.
3. Щипачев А. М. Методы расчета усталостной долговечности и предела выносливости с учетом модифицированных поверхностных слоев. Уфа: УТИС, 2000. 110 с.

## ОБ АВТОРАХ



**Щипачев Андрей Михайлович**, проф. каф. техн. машиностр. Д-р техн. наук по спец. 05.02.01 (ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. прогнозир. характеристик усталостн. прочности с учетом технологии обработки.



**Хакимова Регина Рамильевна**, магистрант. Дипл. спец. в обл. техн. машиностр. (УГАТУ, 2008).



**Черняховская Лилия Рашитовна**, проф. каф. техн. киб. (УГАТУ, 2008). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. системн. анализа, интеллект. инф. систем, систем поддержки принятия решений, упр-я качеством.