

УДК 621.787

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Нерсисян Д.А.¹, студент гр. МТа-231, III курс

Научный руководитель: Блюменштейн В.Ю.¹, д.т.н., профессор

¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

В статье предложен гибридный подход к прогнозированию релаксации остаточных напряжений (ОН), основанный на сочетании феноменологических моделей и методов искусственного интеллекта. Рассмотрены классические модели релаксации (Биргер, Кодама, Жуанг–Халфорд, Троценко–Жабко) и предложена методика построения нейросетевой модели для прогнозирования остаточных напряжений при циклическом нагружении до 10^8 циклов. Приведены зависимости, характеризующие влияние параметров ППД и нагружения на скорость релаксации. Разработанная модель позволяет адаптивно учитывать условия обработки и нагружения, обеспечивая повышение точности прогноза циклической долговечности деталей.

Как известно, поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из наиболее эффективных методов упрочнения поверхностных слоёв деталей из конструкционных сталей [1-3]. После обработки в материале формируются сжимающие остаточные напряжения, повышающие сопротивление усталостному разрушению. Однако при циклическом нагружении происходит постепенная релаксация остаточных напряжений (ОН), приводящая к снижению положительного эффекта ППД [4].

Ранее было установлено, что кинетика релаксации ОН определяется не только амплитудой внешних напряжений и пределом текучести материала, но и характеристиками упрочнённого слоя: степенью и глубиной упрочнения и температурой испытаний [5-6]. Существующие феноменологические модели (Kodama, Birger, Jhansale–Torrey, Троценко–Жабко) позволяют описать релаксацию в общем виде, однако требуют индивидуальной подгонки параметров для каждого технологического режима [7-8].

Таким образом, возникает необходимость в модели, способной самостоятельно адаптироваться к условиям обработки и нагружения. В настоящей работе предлагается нейросетевой подход, использующий обучающую выборку,

построенную на базе известных феноменологических моделей и экспериментальных данных по стали 45 ГОСТ 1050-2013, подвергнутой ППД и циклическим испытаниям до 10^8 циклов.

Рассмотрена задача описания остаточных напряжений σ в функции числа циклов N при фиксированных параметрах ППД. Как было отмечено выше, ряд классических зависимостей описывает релаксацию в логарифмической, степенной или экспоненциальной форме.

Модель Кодама [6]:

$$\sigma(N) = A - m \ln N, \quad (1.1)$$

где A — исходное значение остаточного напряжения, m — параметр, характеризующий скорость релаксации.

Модель Биргера [1]:

$$\sigma(N) = \sigma_0 \exp(-kN), \quad (1.2)$$

где k — коэффициент скорости релаксации, зависящий от микроструктурного состояния и температуры.

Механистическая модель Жуанга–Халфорда [4]:

$$\sigma(N) = \sigma_0 \exp\left(-k \frac{\sigma_a}{\sigma_y} N\right), \quad (1.3)$$

где σ_a — амплитуда цикла, σ_T — предел текучести материала.

Как показано в работе Трощенко и Жабко [6], релаксация остаточных напряжений сопровождается перераспределением внутренних моментов в упрочнённом слое:

$$M(N) = \int_0^h \sigma_{res}(z, N) z dz, \quad (1.4)$$

что оказывает влияние на кинетику неупругого деформирования.

Однако все указанные модели требуют априорного знания параметров m , k и σ_0 . Поэтому в данной работе предложено использовать метод машинного обучения для прогнозирования формы кривой $\sigma(N)$ по входным параметрам технологического и нагруженного состояния.

Обучающая выборка формировалась на основе синтетических данных, рассчитанных по моделям (1.1)–(1.4) с параметрами, характерными для стали 45 после ППД роликом ($\sigma_0 = 600$ МПа, $k = 10^{-8} - 10^{-9}$, $h = 0,1$ мм, $t/h = 0,1$).

Входные параметры нейросети:

- степень упрочнения ε ;

- толщина упрочнённого слоя h ;
- относительную (безразмерную) глубину залегания остаточных напряжений t/h . t — это текущее расстояние от поверхности детали до рассматриваемой точки;
- амплитуда цикла σ_a ;
- температура T ;
- предел текучести σ_T .

Выходной параметр – остаточное напряжение $\sigma(N)$.

Использовалась полносвязная нейронная сеть (MLP) с двумя скрытыми слоями по 64 и 32 нейрона, функцией активации ReLU и выходным линейным слоем. Функция потерь – MSE (среднеквадратическая ошибка), оптимизатор Adam, размер батча = 64. Для предотвращения переобучения использован метод регуляризации Dropout (0,1).

Обучение проводилось на 80 % синтетических данных, валидация – на 20 %. Критерии точности: коэффициент детерминации R^2 и средняя абсолютная ошибка MAE.

Как показали результаты обучения, нейросетевая модель воспроизводит известные закономерности релаксации с высокой точностью. При этом сеть корректно описывает двухфазный характер релаксации:

1. быстрая стадия – при $N < 10^4$,
2. медленная стадия – при $N > 10^5$.

На рис. 1 представлено сравнение расчётных данных по модели Биргера (1.2) и предсказаний нейросети при различных степенях упрочнения ε . При увеличении ε от 0,3 до 0,6 скорость релаксации уменьшается почти в два раза, что согласуется с данными работ [5-9].

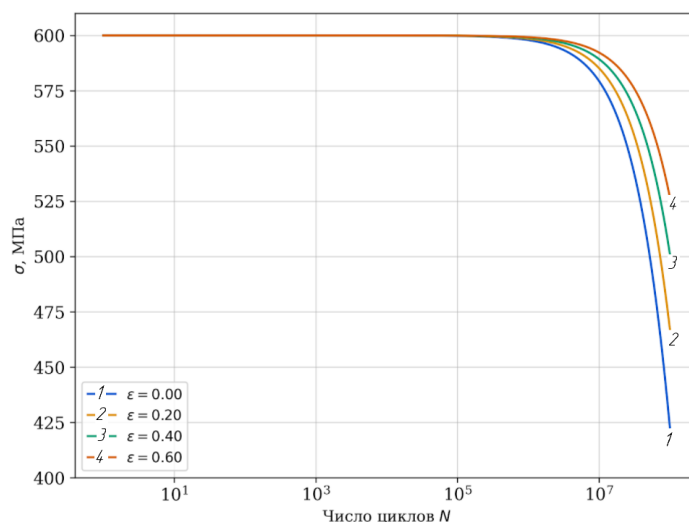


Рис. 1 – Зависимость релаксации остаточных напряжений σ от числа циклов нагружения N при различных значениях степени упрочнения ε [1]

Как было отмечено выше, температура испытаний оказывает значительное влияние на параметр k . На рис. 2 показано, что при повышении T с 20 до 200 °C величина σ на 10^8 циклах снижается с 450 до 320 МПа.

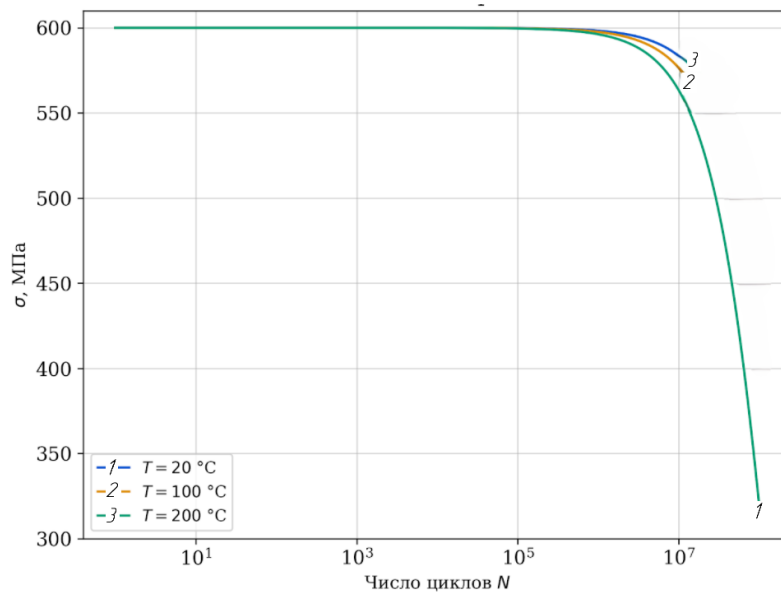


Рис. 2 – Кинетика изменения остаточных напряжений σ в зависимости от температуры T при фиксированных параметрах упрочнения

Таким образом, следует отметить, что нейросеть не только аппроксимирует форму кривой $\sigma(N)$, но и позволяет оценивать вклад каждого параметра. При этом выявлена устойчивая зависимость:

$$k_{\text{эфф}} = k_0 \exp(-\gamma CW) \left(1 + \beta \frac{T}{T_0}\right), \quad (1.5)$$

где k_0, γ, β – эмпирические коэффициенты, определяемые регрессией по данным сети.

Эта зависимость может быть интерпретирована как феноменологическое ядро новой модели релаксации, где влияние упрочнения и температуры включено напрямую.

На рис. 3 представлены усреднённые кривые $\sigma(N)$ для различных σ_a . С ростом амплитуды цикла наблюдается ускорение релаксации, что согласуется с механистической моделью Жуанга–Халфорда (1.3).

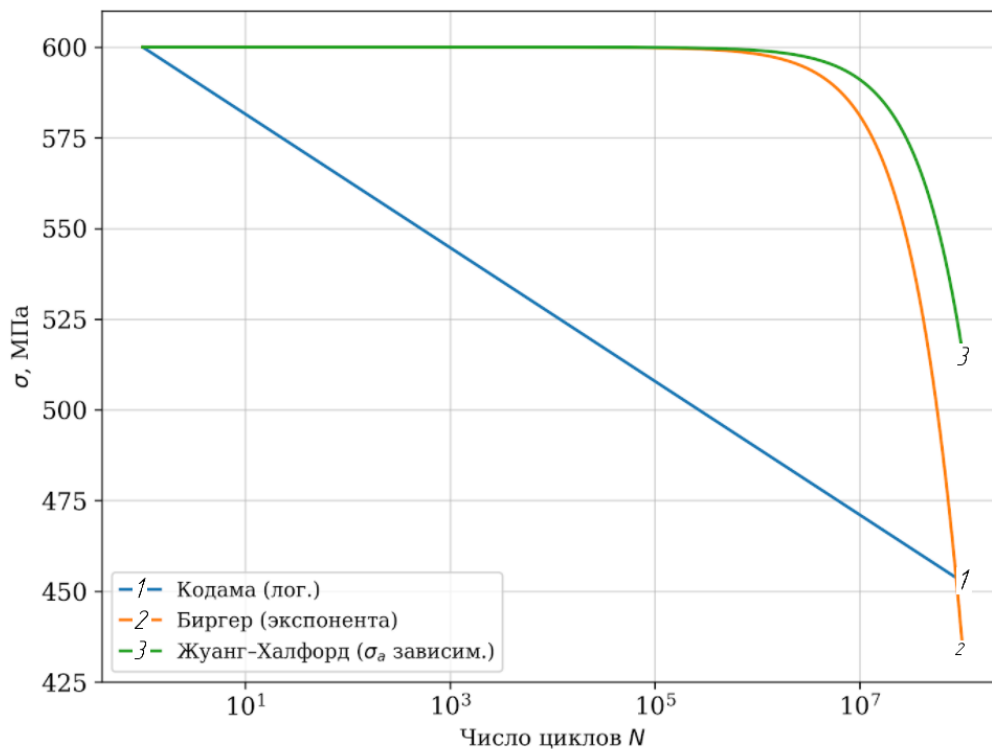


Рис. 3 – Сравнение моделей релаксации остаточных напряжений $\sigma(N)$

Таким образом, предложен нейросетевой подход к прогнозированию релаксации остаточных напряжений стали 45. Как показали расчёты и анализ, нейросеть воспроизводит физические закономерности, отражённые в моделях Биргера (1.2), Кодама (1.1) и Трощенко–Жабко (1.4), при этом устраняя необходимость ручной идентификации параметров.

Ранее было установлено, что скорость релаксации определяется микроструктурой и температурой, и эти зависимости подтверждены в нейросетевой модели. Предложенная обобщённая зависимость (1.5) позволяет интерпретировать влияние технологических факторов через эффективный коэффициент релаксации.

Полученные результаты могут быть использованы для:

- прогнозирования остаточных напряжений в деталях при проектировании процессов ППД;
- адаптивного расчёта циклической долговечности с учётом релаксации ОН;
- разработки интеллектуальных систем подбора режимов упрочнения.

Таким образом, данная работа объединяет классическое феноменологическое моделирование и современные методы искусственного интеллекта, создавая основу для интеллектуальных инженерных расчётов в области поверхностного упрочнения.

Список литературы

- 1) Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. - 232 с.
- 2) Технологические остаточные напряжения/ под ред. А.В.Подзея. М.: Машиностроение, 1973. 47 с.
- 3) Кудрявцев И.В. Упрочнение галтелей крупных валов поверхностным наклепом. — Москва : Б. и., 1956. — 12 с.
- 4) Zhuang W.Z., Halford G.R. *Investigation of residual stress relaxation under cyclic load*, *Int. J. Fatigue*, Vol.23, No.1, 2001, pp.31–37.
- 5) Трощенко В.Т., Жабко Н.И. «Исследование влияния остаточных напряжений на закономерности неупругого циклического деформирования металлов в условиях неоднородного напряжённого состояния», журнал *Проблемы прочности*, 1979, № 8, с. 25–29.
- 6) S. Kodama, The behavior of residual stress during fatigue stress cycles, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Behavior of Metals II*, Society of Material Science, Kyoto (1972) 111–118.
- 7) Jhansale, H. R., "A New Parameter for the Hysteresis Stress-Strain Behavior of Metals," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions, ASME, Jan., 1973, pp. 33-38.
- 8) Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. - М.: Машиностроение-!, 2007. - 400 с. - ISBN 5-942-75342-9.