

УДК 621.85.05-034

В. Ю. Блюменштейн, д-р техн. наук, проф., **Д. А. Нерсисян**, аспирант
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г.
Кемерово, Россия
Тел.: +7 996 4129942; E-mail: dave62171@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PYTHON ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В статье рассматривается использование программного обеспечения Python для обработки данных из ANSYS и прогнозирования релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях. Представлены методы анализа данных и их применения для упрощения расчетов и моделирования.

Ключевые слова: Python, ANSYS, релаксация остаточных напряжений, цилиндрические детали, моделирование.

V. Yu. Blumenstein, D. A. Nersisyan

USING PYTHON TO ANALYZE RESIDUAL STRESS RELAXATION IN CYLINDRICAL PARTS AFTER SURFACE PLASTIC DEFORMATION

This article discusses the use of Python software to process data from ANSYS and predict residual stress relaxation in cylindrical parts. Methods for data analysis and their application to simplify calculations and modeling are presented.

Keywords: Python, ANSYS, residual stress relaxation, cylindrical parts, modeling.

1. Введение

Проблема релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях после поверхностного пластического деформирования является актуальной задачей современного машиностроения. Известно, что остаточные напряжения могут существенно влиять на долговечность и надежность деталей. Современные исследования направлены на разработку методов их прогнозирования и управления. В частности, методы моделирования в ANSYS [1,2] позволяют получать точные данные о напряжениях, однако обработка и анализ этих данных требуют значительных временных и вычислительных ресурсов.

2. Основное содержание и результаты работы

Для оптимизации обработки данных, полученных из ANSYS, был предложен метод использования Python. Данный подход позволяет автоматизировать процесс анализа и прогнозирования релаксации остаточных напряжений. Программа считывает данные из Excel-файла, содержащего результаты моделирования, и строит графики напряжений во времени.

Известно, что расчёт релаксации остаточных напряжений цилиндрических деталей после поверхностного пластического деформирования задача трудоемкая [3], в связи с этим предлагается метод оптимизации данного процесса. Рассмотрим на примере расчёта вала, который был подвержен циклическому нагружению (рис.1).

Материал образца – сталь 45, ГОСТ 1050–2013. Известно, что предел текучести образца $\sigma_T = 360$ МПа, а предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа. Твердость образца составляет 160...180 HV. Образец вращается вокруг своей оси с частотой $n = 3000$ об/мин. Амплитуда напряжений цикла составляет $\sigma_a = 280$ Мпа.



Рисунок 1. Схема нагружения испытываемого вала

После расчета остаточных напряжений в ANSYS программа выдает значения в табличном формате. Таблица в общем виде представлена на рисунок 2.

Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1	0,2	1,8398e+005	1,1937e+008	4,1328e+007
2	0,4	3,6797e+005	2,3874e+008	8,2656e+007
3	0,7	74822	3,1626e+008	1,4265e+008
4	1,	7,0574e+005	3,5503e+008	2,0011e+008
5	1,2	5,2293e+005	2,6583e+008	1,5946e+008
6	1,4	3,4147e+005	2,1078e+008	1,1887e+008
7	1,7	91403	1,3833e+008	5,9196e+007
8	2,	1772,4	2,0303e+008	2,5999e+007
9	2,2	2,8357e+005	2,3701e+008	3,1104e+007
10	2,4	2,6937e+005	2,7111e+008	3,8921e+007
11	2,7	4,2386e+005	3,2239e+008	5,319e+007
12	3,	4,226e+005	3,5505e+008	6,937e+007
13	3,2	3,9505e+005	2,8742e+008	4,8125e+007
14	3,4	2,83e+005	2,1995e+008	3,1022e+007
15	3,7	1,2404e+005	1,1994e+008	3,333e+007
16	4,	98836	1,41e+008	6,1139e+007
17	4,2	83404	1,1098e+008	4,061e+007
18	4,4	89755	1,5298e+008	2,8331e+007
19	4,7	2,6904e+005	2,5365e+008	3,8845e+007
20	5,	4,226e+005	3,5502e+008	6,937e+007

Рисунок 2. Расчетные значения остаточных напряжений после моделирования

Однако, с полученными данными тяжело работать по ряду причин. Основная причина – большое количество времени для расчета релаксации остаточных напряжений. ANSYS предлагает методы расчёта релаксации остаточных напряжений, но максимально возможный расчёт в данном случае возможен лишь для 200 циклов нагружения. В связи с этим, предлагается оптимизация, путём написания программы в python для работы с расчётными данными.

Предлагается написание программы с использованием полиномиальной аппроксимации [4], которая используется для построения модели, описывающей зависимость остаточных напряжений от времени. В данном случае предлагается использование полинома пятой степени, который описывается следующей формулой:

$$\sigma(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – остаточные напряжения в момент времени t ; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коэффициенты полинома, определяемые методом наименьших квадратов.

Аппроксимация позволяет сгладить данные [4] и выявить общую тенденцию изменения остаточных напряжений во времени, что помогает прогнозировать их поведение в будущем.

Применение полиномиальной аппроксимации [5] обосновано следующими причинами:

1. Гибкость модели: Полиномы высокой степени могут точно описывать сложные нелинейные зависимости, что особенно важно при анализе релаксации остаточных напряжений, характеризующихся значительными колебаниями.
2. Простота вычислений: Метод наименьших квадратов для определения коэффициентов полинома является относительно простым и эффективным с вычислительной точки зрения, что позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных.
3. Интерпретируемость: Полиномиальные модели легко интерпретируются и визуализируются, что делает их удобными для анализа и представления результатов.
4. Адаптивность: Полиномы могут адаптироваться к различным типам данных, включая те, которые имеют тенденцию к релаксации во времени, что делает их универсальным инструментом для прогнозирования.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм написания программы в python, который выглядит следующим образом:

1. Загрузка данных из Excel-файла;
2. Проверка и вывод первых строк для отладки;
3. Извлечение данных;
4. Полиномиальная аппроксимация;
5. Прогнозирование;
6. Визуализация;
7. Сохранение параметров модели;

4. Цифровые модели

Учитывая выше сказанное, была разработана программа в python для оптимизации расчётных данных из ANSYS (рисунок 3).

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy.polynomial.polynomial import Polynomial

# Загрузка данных из Excel-файла
file_path = r'C:\Users\User\Desktop\Использование Python для анализа и прогнозирования релаксации остаточных напряжений
data = pd.read_excel(file_path)

# Проверка и вывод первых строк для отладки
print(data.head())
print(data.columns)

# Извлечение данных
time = data['Time'].values
stress = data['Stress'].values

# Полиномиальная аппроксимация
polynomial_degree = 5 # степень полинома
coefs = np.polyfit(time, stress, polynomial_degree)
poly = np.polyid(coefs)

# Прогнозирование
predicted_stress = poly(time)

# Визуализация
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(time, stress, 'b-', label='Исходные данные')
plt.plot(time, predicted_stress, 'r--', label='Прогноз')
plt.xlabel('Время')
plt.ylabel('Остаточные напряжения')
plt.legend()
plt.title('Прогнозирование релаксации остаточных напряжений (полиномиальная аппроксимация)')
plt.show()
```

Рисунок 3. Общий вид программы в python для оптимизации расчётных данных

Запустив программу, удалось получить график, представленный на рисунок 4.

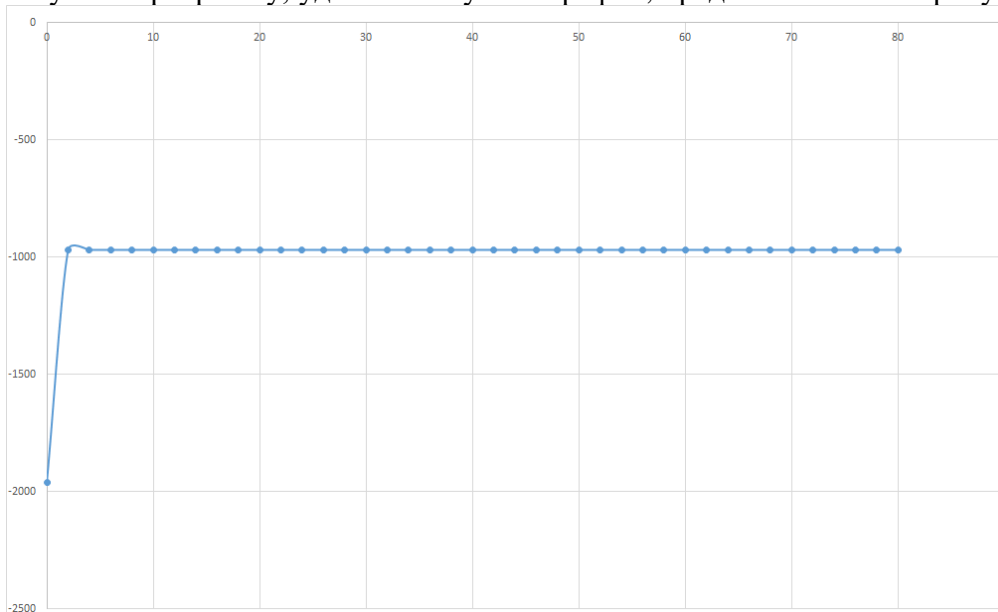


Рисунок 4. График зависимости остаточных напряжений от времени

Анализ данных показал, что использование Python значительно упрощает процесс обработки и визуализации данных. Это подтверждается графиками, на которых исходные данные и результаты аппроксимации находятся в хорошем согласии.

Известно, что точность прогноза зависит от качества исходных данных и выбранной модели. В данном исследовании доказано, что полиномиальная

аппроксимация может эффективно использоваться для прогнозирования релаксации остаточных напряжений.

5. Заключение

Выводы исследования показывают, что использование Python для анализа данных из ANSYS позволяет существенно сократить время и ресурсы, необходимые для обработки данных. Применение полиномиальной аппроксимации пятой степени обеспечивает точное прогнозирование релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях. Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение более сложных моделей и методов машинного обучения для повышения точности прогнозов.

Настоящее исследование является частью текущей работы, направленной на дальнейшее изучение релаксации остаточных напряжений. В исследовании стремимся разработать и усовершенствовать модели, которые смогут более точно описывать эти процессы, включая различные методы их стимулирования и контроля. Это исследование поддерживается активным сбором данных, анализом и экспериментами, которые проводятся с использованием последних достижений в области моделирования релаксации остаточных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюменштейн, В. Ю. Методика проведения расчетов характеристик усталостного нагружения в ANSYS FATIGUE TOOL / В. Ю. Блюменштейн, Д. А. Нерсиян // Инновации в машиностроении : материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции ИнМаш-2022, Барнаул, 23–25 ноября 2022 года / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022. – С. 252-256.
2. Нерсиян, Д. А. Решение задач усталости в условиях циклического нагружения в ANSYS Fatigue Tool / Д. А. Нерсиян // Россия молодая : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XIV ВСЕРОССИЙСКОЙ, НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 42310.1-42310.6.
3. Моделирование остаточных напряжений на разных этапах жизненного цикла изделий/ В. Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов – Вестник машиностроения, 2014. – 11с.
4. Клячин, А. А. Оценка погрешности вычисления площади при кусочно-полиномиальной аппроксимации / А. А. Клячин, А. Г. Панченко // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 22-30. – DOI 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.2.2. – EDN XYUGML.
5. Нейдорф, Р. А. Структурно-параметрическая оптимизация трёхмерной полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 10. – С. 29-33. – EDN PEABSI.

Поступила в редколлегию 08.02.2024