

На правах рукописи



Фомин Денис Юрьевич

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ТЕОРИЙ
ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ И
НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ**

Специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех)

Научный **Бондарь Валентин Степанович**

руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные **Молодцов Игорь Николаевич**

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры теории упругости

Темис Юрий Моисеевич

доктор технических наук, профессор, ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», начальник отдела

Ведущая

организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

Защита состоится «22» ноября 2022 г. на заседании диссертационного совета 99.2.059.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92 (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-999-191-02/Fomin_D_Yu/).

Автореферат разослан «28» сентября 2022 года

Учёный секретарь
диссертационного совета



Глаголев Вадим Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена выбором моделей поведения материалов. Рассматриваемые варианты теорий являются широко используемыми в практике расчета напряженно-деформированного состояния высоконагруженных элементов конструкций. Сравнение выбранных моделей проводится на основе процессов пропорциональных и непропорциональных циклических нагружений, возникающих при эксплуатации отдельных элементов ответственных высоконагруженных конструкций.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время для моделирования процессов пропорциональных и непропорциональных циклических нагружений различными авторами разработан ряд математических моделей. Верификация этих моделей проводится как правило по результатам эксперимента. Однако не всегда эти эксперименты охватывают весь спектр реализуемых в конструкциях режимов нагружения. Ошибки при моделировании процессов нагружений при таких режимах могут привести к завышенным или заниженным оценкам ресурса всей конструкции.

Цель работы. Проведение сравнительного анализа моделей упругопластического деформирования материалов и выбор модели, наиболее подходящей для моделирования процессов пропорционального и непропорционального нестационарного циклического нагружения.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

- 1) Выбор моделей пластичности, широко используемых при проведении моделирования процессов пропорциональных и непропорциональных циклических нагружений;
- 2) Выбор экспериментальных исследований по непропорциональному нагружению, в которых реализуется широкий ряд особенностей процесса упругопластического деформирования;
- 3) Разработка методов идентификации материальных параметров для всех выбранных моделей и определение материальных параметров применяемых в экспериментах материалов;
- 4) Разработка алгоритма и программы для проведения расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния;
- 5) Проведение расчетов выбранных экспериментов с помощью моделей пластичности и сравнение результатов расчетов с результатами эксперимента при непропорциональном нагружении;
- 6) Проведение экспериментов по жесткому и мягкому несимметричному циклическому нагружению образцов материала 12X18H10T, в которых проявляются процессы посадки и вышагивания петли пластического гистерезиса;

7) Выбор моделей пластичности, позволяющих описывать эффекты посадки и вышагивания петли пластического гистерезиса. Разработка метода идентификации материальных параметров этих моделей;

8) Проведение расчетов экспериментов по несимметричному пропорциональному циклическому нагружению как жесткому, так и мягкому. Сравнение результатов расчетов и экспериментов;

9) Формулировка выводов об использовании различных моделей пластичности при расчете кинетики напряженно-деформированного состояния при различных режимах нагружения.

Научная новизна работы. На широком спектре программ экспериментальных исследований проведен сравнительный анализ наиболее используемых в практических расчетах вариантов теорий пластичности при пропорциональных и непропорциональных режимах циклического нагружения. Рассмотрены плоские и пространственные траектории деформаций, нестационарные несимметричные жесткие и мягкие режимы циклических нагружений. Расчеты кинетики напряженно-деформированного состояния при пропорциональных и непропорциональных циклических нагружениях для рассматриваемых теорий не проводились ранее. Проведены эксперименты по мягкому и жесткому циклическому нагружению с посадкой и вышагиванием петли пластического гистерезиса.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты имеют теоретическую ценность и практическую значимость для моделирования процессов деформирования изделий, работающих в условиях пропорционального и непропорционального циклического нагружения. Полученные результаты позволят увеличить точность моделирования этих процессов.

Методология и методы исследования. Математическое моделирование процессов пропорциональных и непропорциональных циклических нагружений проводится с использованием разработанного программного обеспечения. Экспериментальные исследования проведены на универсальной испытательной машине Zwick Z100.

Положения, выносимые на защиту:

1) Метод идентификации материальных функций для всех описанных теорий пластичности, материальные функции сплавов 40X16H9Г2С, 9Х2, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9, SS304, стали 45;

2) Программа расчета кинетики напряженно-деформированного состояния;

3) Результаты сравнительного анализа теорий пластичности при непропорциональных циклических нагружениях по плоским (многозвенным ломаным, криволинейным постоянной и переменной кривизны) траекториям деформаций;

4) Результаты сравнительного анализа теорий пластичности при непропорциональных циклических нагружениях по пространственным

(винтовые траектории постоянной и переменной кривизны и кручения) траекториям деформаций;

5) Результаты проведения экспериментов по жесткому и мягкому несимметричному пропорциональному циклическому нагружению сплава 12Х18Н10Т.

6) Результаты сравнительного анализа теорий пластичности при жестком и мягком несимметричном циклическом нагружении.

Достоверность результатов подтверждается проверкой полученных материальных функций всех рассматриваемых моделей по результатам расчета экспериментов по одноосному растяжению. Сравнением результатов всех расчетов с помощью выбранных вариантов теорий пластичности с результатами экспериментов при пропорциональных и непропорциональных циклических нагружениях.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены на:

1) Машиноведение и инновации. XXIX Конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2017) (Москва, 2017 г.);

2) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (Москва, 2018 г.);

3) IX международном научном симпозиуме «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела», посвященного 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора Зубчанинова Владимира Георгиевича (Тверь, 2020 г.);

4) Международной конференции «Наука и техника в дорожной отрасли» (Москва, 2021 г.);

5) Отраслевой научно-практической конференции «Космонавтика XXI века» (Королев, 2021 г.);

6) XXX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2021 г.);

7) 64-ой Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва, 2021 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 6 [22-24, 133-135] научных работах, в том числе в 4 статьях [24, 133-135], входящих в Перечень Российских рецензируемых научных изданий, и 3 [133-135] из которых в изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, получены лично соискателем в процессе научной деятельности. Заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников и одного приложения. Общий объем работы составляет 174 страницы, в том числе 142 страницы основного текста, содержит 140

рисунков, 32 таблицы и 1 приложение. Список использованных источников включает в себя 180 наименований на 17 страницах. Объем приложения составляет 11 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель работы и основные задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, перечислены методы исследования и приведены сведения об апробации работы, публикациях и структуре диссертации и дан краткий обзор.

Первая глава посвящена теориям пластичности, анализируемым при непропорциональном нагружении. Приводятся варианты теорий пластичности, которые наиболее распространены в практических расчетах кинетики напряженно-деформированного состояния. Для всех вариантов теорий тензор скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ представляется в виде суммы тензоров скоростей упругой $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ и пластической $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (1)$$

Тензор скоростей упругих деформаций определяется обобщенным законом Гука:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}_0\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})], \quad (2)$$

где E, ν – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона; σ_{ij} – тензор напряжений; $\sigma_0 = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ – среднее напряжение; δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение поверхности нагружения для всех рассматриваемых вариантов теорий принимается в виде:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C_p^2 = 0. \quad (3)$$

Здесь $s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}$ – девиатор активных напряжений; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0$ – девиатор напряжений; a_{ij} – девиатор микронапряжений; C_p – размер (радиус) поверхности нагружения.

Тензор скоростей пластической деформации определяется ассоциированным с (3) градиентальным законом течения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_u^*} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p. \quad (4)$$

Здесь σ_u^* – интенсивность активных напряжений; $\dot{\varepsilon}_{u^*}^p$ – скорость накопленной пластической деформации.

Для всех рассматриваемых вариантов теорий изотропное упрочнение определяется зависимостью радиуса поверхности нагружения от накопленной пластической деформации:

$$C_p = C_p(\varepsilon_{u^*}^p). \quad (5)$$

Рассматриваемые варианты отличаются эволюционными уравнениями для смещения центра поверхности нагружения (анизотропное упрочнение).

Модель изотропного упрочнения

$$a_{ij} = 0. \quad (6)$$

Модель Ишлинского-Прагера-Кадашевича-Новожилова (ИПКН)

$$a_{ij} = \frac{2}{3} g \varepsilon_{ij}^p, \quad (7)$$

где g – параметр материала.

Модель Оно-Ванга

$$\dot{a}_{ij} = \sum_{m=1}^M \dot{a}_{ij}^{(m)}, \dot{a}_{ij}^{(m)} = \frac{2}{3} g^{(m)} \varepsilon_{ij}^p, \quad (8)$$

$$g^{(m)} = \begin{cases} \beta^{(m)} \sigma_a^{(m)}, \\ 0, \text{ если } a_u^{(m)} \geq \sigma_a^{(m)} \cap a_{ij}^{(m)} s_{ij}^* > 0, \end{cases} \quad a_u^{(m)} = \left(\frac{3}{2} a_{ij}^{(m)} a_{ij}^{(m)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где $\sigma_a^{(m)}, \beta^{(m)}$ – параметры материала, M – количество уравнений (далее в работе M принимается равным 10).

Модель Шабоса

$$\dot{a}_{ij} = \sum_{m=1}^M \dot{a}_{ij}^{(m)}, \quad (10)$$

$$\dot{a}_{ij}^{(m)} = \frac{2}{3} C^{(m)} \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \gamma^{(m)} a_{ij}^{(m)} \dot{\varepsilon}_u^{p*}, \quad (11)$$

где $C^{(m)}$ и $\gamma^{(m)}$ – параметры материала.

Модель Армстронга-Фредерика-Кадашевича (АФК)

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} C \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \gamma a_{ij} \dot{\varepsilon}_u^{p*}, \quad (12)$$

где C и γ – параметры материала.

Модель Бондаря

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^p + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_u^{p*}, \quad (13)$$

$$g = E_a + \beta \sigma_a, g_\varepsilon = E_a \beta, g_a = -\beta, \quad (14)$$

где E_a, σ_a и β – параметры материала.

Модель Темиса-Худяковой

$$a_{ij} = a_1(\varepsilon_u^{p*}) \varepsilon_{ij}^p + a_2(\varepsilon_u^{p*}) \xi_{ij}, \quad (15)$$

$$\dot{\xi}_{ij} = K(\sigma_u, \varepsilon_u^{p*}) \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (16)$$

Здесь a_1, a_2, K – материальные функции.

Базовым экспериментом, по которому в дальнейшем определяются материальные функции, является испытание при одноосном растяжении. По результатам эксперимента определяется диаграмма растяжения, связывающая значения деформации с соответствующими им значениями напряжений:

$$\sigma_{\text{раст}} = f(\varepsilon_{\text{раст}}). \quad (17)$$

Для определения параметров анизотропного упрочнения для моделей Оно-Ванга, Шабаша, Армстронга-Фредерика-Кадашевича и Бондаря используется диаграмма $\sigma_{\text{рпс}} = f(\varepsilon_{\text{рпс}})$ растяжения материала после предварительного сжатия до деформации порядка 1 %. В случае отсутствия экспериментальных данных диаграмма растяжения после предварительного сжатия определяется путем перестроения диаграммы растяжения по принципу Мазинга:

$$\varepsilon_{\text{рпс}} = 2 \cdot \varepsilon_{\text{раст}}, \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{рпс}} = 2 \cdot \sigma_{\text{раст}}. \quad (19)$$

Упругие параметры E, ν для всех материалов определяются традиционными методами и приводятся в справочных материалах.

Для определения остальных параметров моделей диаграммы растяжения и растяжения после предварительного сжатия необходимо перестроить в координатах пластическая деформация – напряжение. Начальное значение размера поверхности нагружения $C_p^{(0)}$ для всех моделей пластичности определяется по диаграмме растяжения и заданному допуску на пластическую деформацию. Значения допуска выбрано равным 0,0002.

Далее по зависимостям $\sigma_{\text{раст}} = f(\varepsilon_{\text{раст}}^p)$ и $\sigma_{\text{рпс}} = f(\varepsilon_{\text{рпс}}^p)$ определяются параметры микронапряжений, для этого уравнения теорий пластичности необходимо записать для случая одноосного нагружения. Функция изотропного упрочнения для всех моделей определяется путем вычитания из диаграммы растяжения $\sigma_{\text{раст}} = f(\varepsilon_{\text{раст}}^p)$ определенных значений микронапряжений.

Метод идентификации материальных функций, базовый эксперимент и параметры модели Темиса-Худяковой описаны в работах Ю.М. Темиса и А.Д. Худяковой.

Далее в работе проводится сравнительный анализ теорий пластичности при нагружении по плоским и пространственным траекториям деформирования.

Рассматриваются эксперименты, проведенные по программе жесткого нагружения, получаемой при задании осевого удлинения и угла поворота сечения тонкостенного цилиндрического образца. В этом случае при проведении расчета задаются компоненты скоростей осевой деформаций $\dot{\varepsilon}_{11}$ и сдвиговой деформации $\dot{\varepsilon}_{12}$ как функции времени t .

Рассматриваются эксперименты, проведенные по программе жесткого нагружения, получаемой при задании осевого удлинения, изменения диаметра и угла поворота сечения тонкостенного цилиндрического образца. В этом случае при проведении расчета задаются компоненты скоростей осевой деформаций $\dot{\varepsilon}_{11}$, кольцевой деформации $\dot{\varepsilon}_{22}$ и сдвиговой деформации $\dot{\varepsilon}_{12}$ как функции времени t .

Для проведения расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния на языке Fortran разработана программа. Полученные выше уравнения позволяют сформулировать задачу Коши. Для ее решения

используется метод решения системы дифференциальных уравнений Рунге-Кутты 4-го порядка.

Для удобства сопоставления расчетных и экспериментальных результатов используется векторное пространство А.А. Ильюшина.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов проводится по скалярным и векторным свойствам. Скалярные свойства сравниваются по изменению модуля вектора напряжений по длине траектории деформаций. Векторные свойства сравниваются по изменению угла сближения вектора напряжений и касательной к траектории деформаций.

Вторая глава посвящена сравнительному анализу теорий пластичности при непропорциональных циклических нагружениях по плоским траекториям деформаций. Рассматриваются многозвенные ломаные траектории деформаций в виде квадрата и треугольника; криволинейные траектории деформаций постоянной кривизны в виде окружностей; криволинейные траектории деформаций переменной кривизны в виде астроиды и спирали Архимеда. Экспериментальные исследования проводились В.Г. Зубчаниновым, Н.Л. Охлопковым, В.И. Гулятьевым и другими сотрудниками Тверской научной школы под руководством В.Г. Зубчанинова на тонкостенных трубчатых образцах под действием осевой силы и крутящего момента. Материалы исследований – конструкционные стали 40Х16Н9Г2С, 9Х2 и сталь 45. Экспериментальные результаты на всех рисунках показаны светлыми кружками, а расчетные – сплошными, штриховыми и пунктирными линиями. На рисунках 1-3 представлены скалярные свойства для траектории деформаций в виде треугольника. На рисунках 4-6 представлены скалярные свойства для траектории деформаций в виде астроиды. На рисунках 7-9 представлены скалярные свойства для траектории деформаций в виде окружностей, проходящих через начало координат, а векторные свойства – на рисунках 10-12. На рисунках 13-15 представлены скалярные свойства для траектории деформаций в виде спирали Архимеда, на рисунках 16-18 – векторные.

**Ломаная траектория деформаций в виде треугольника и
криволинейная траектория деформаций переменной кривизны в виде
астроиды**

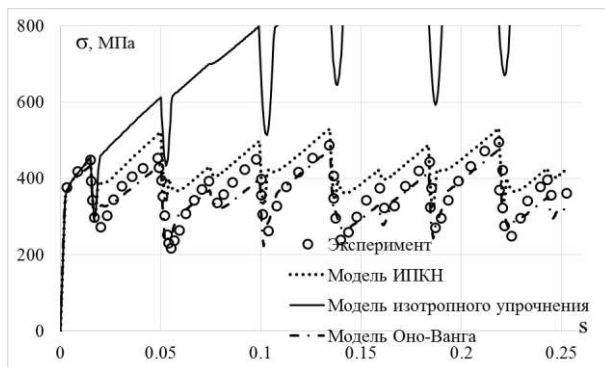


Рис. 1

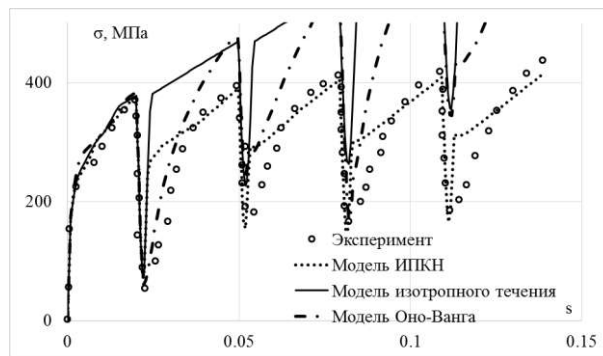


Рис. 4

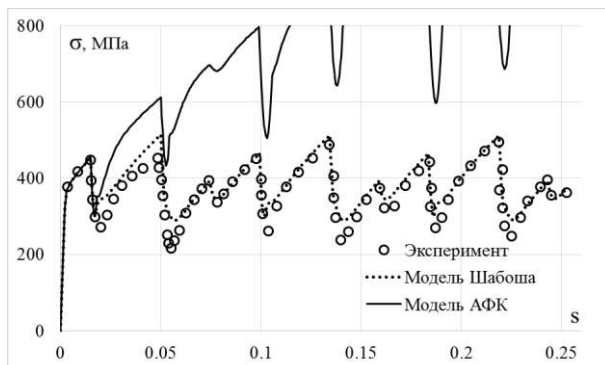


Рис. 2

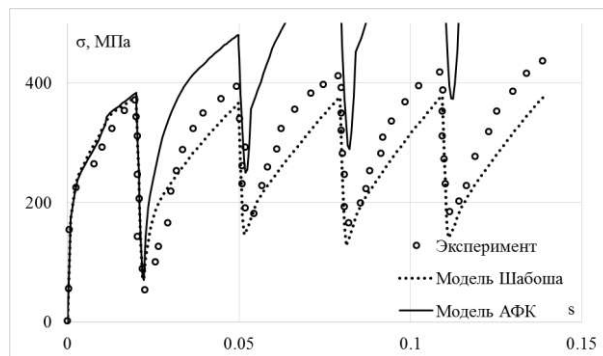


Рис. 5

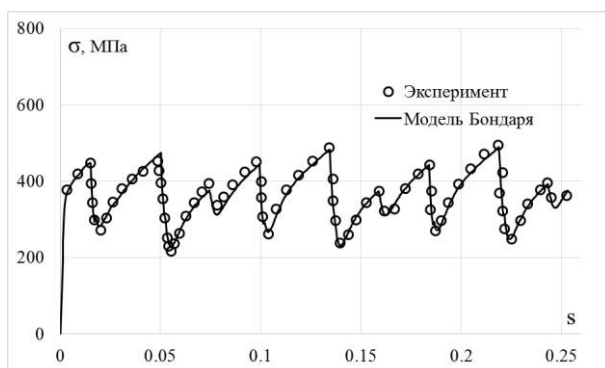


Рис. 3

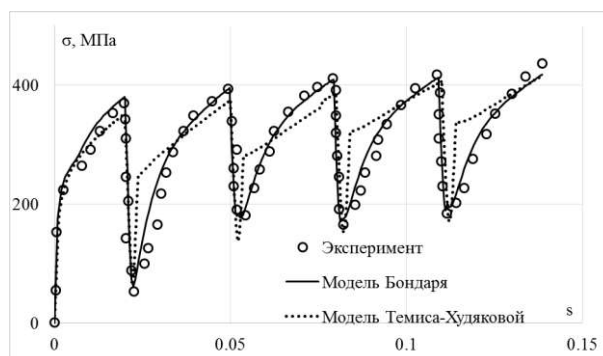


Рис. 6

Криволинейные траектории деформаций постоянной кривизны в виде окружностей, проходящих через начало координат

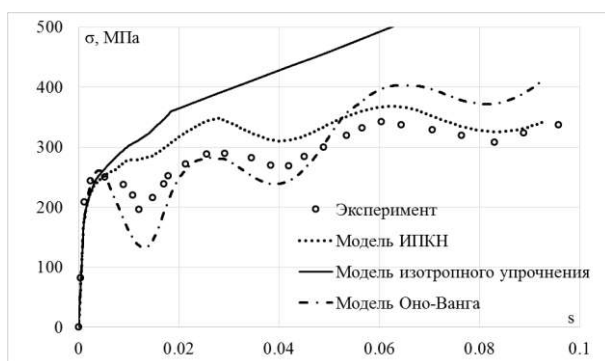


Рис. 7

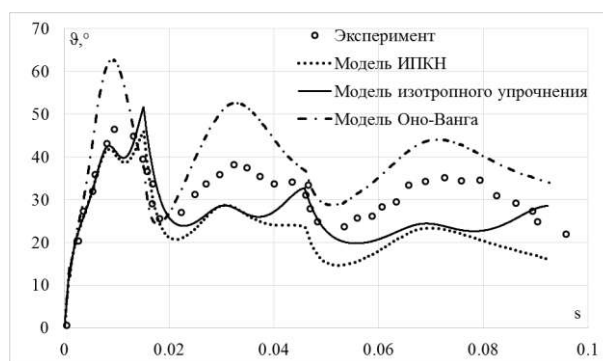


Рис. 10

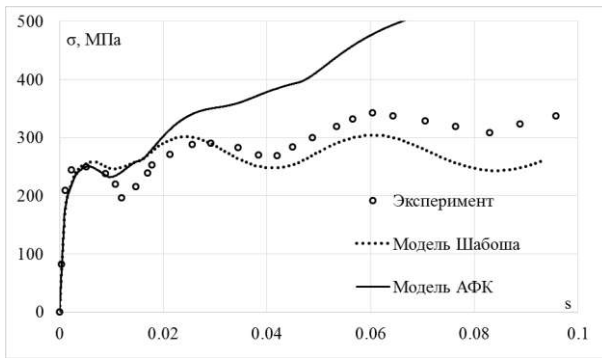


Рис. 8

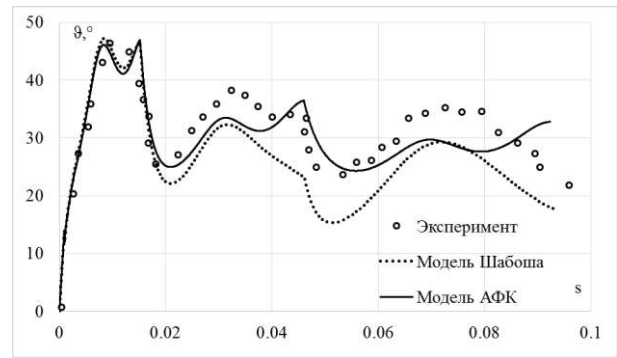


Рис. 11

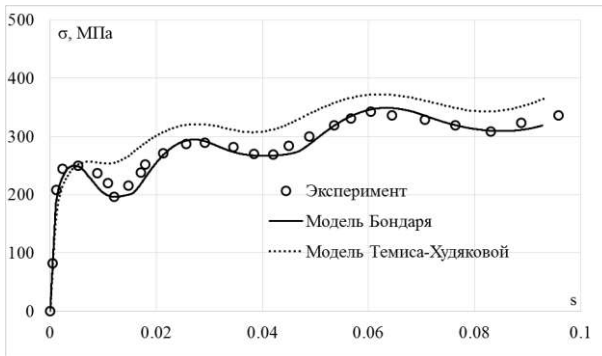


Рис. 9

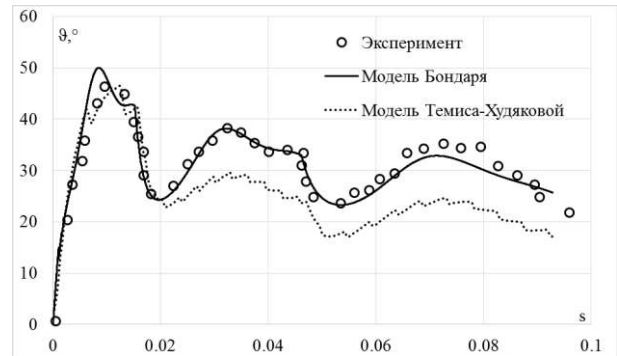


Рис. 12

Криволинейные траектории деформаций переменной кривизны в виде спирали Архимеда

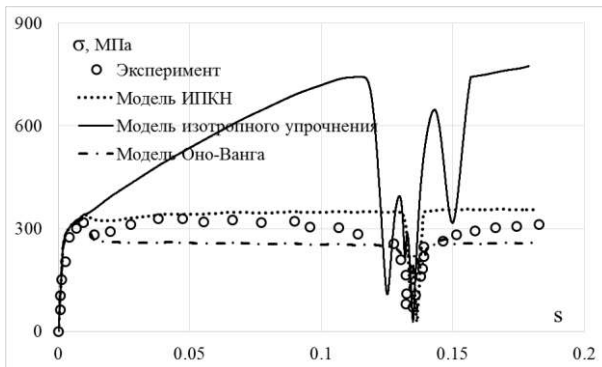


Рис. 13

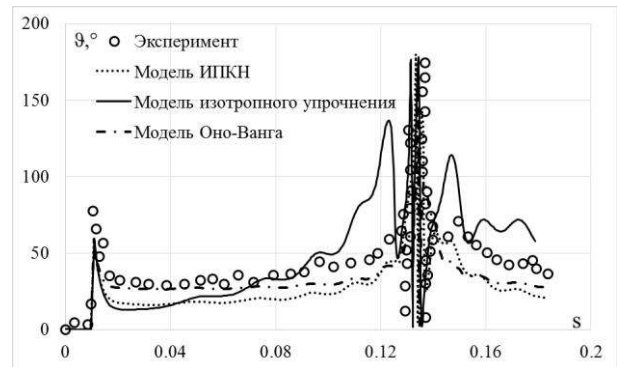


Рис. 16

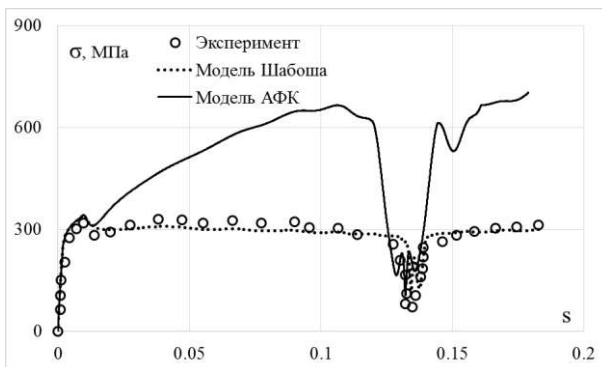


Рис. 14

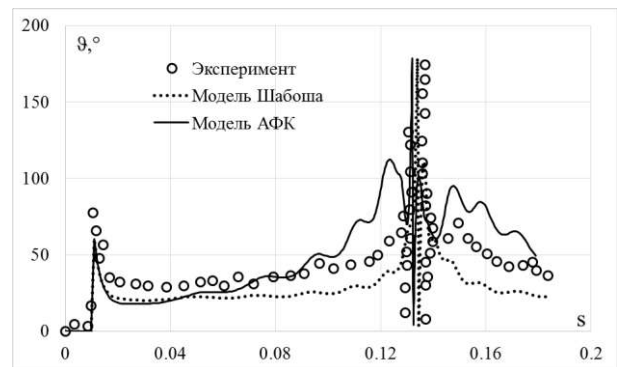


Рис. 17

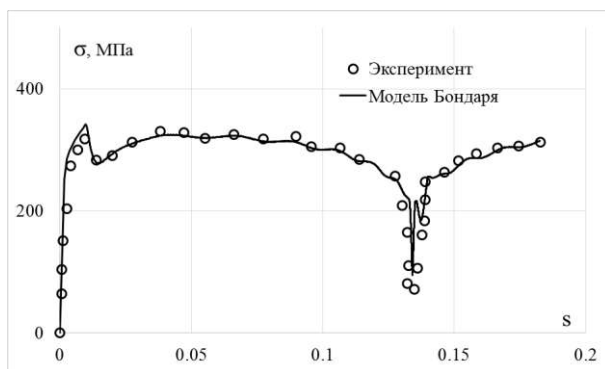


Рис. 15

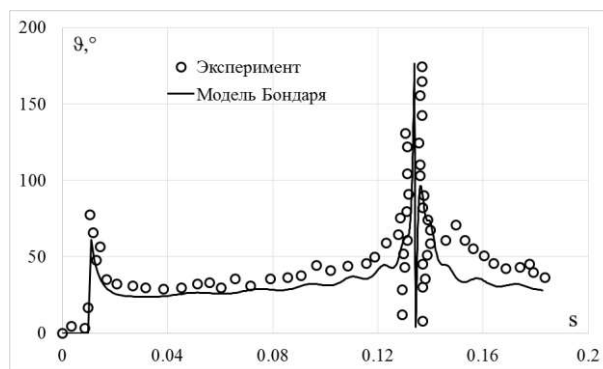


Рис. 18

Третья глава посвящена сравнительному анализу теорий пластичности при непропорциональных циклических нагружениях по пространственным траекториям деформаций. Рассматриваются винтовые траектории деформаций постоянной и переменной кривизны и кручения. Экспериментальные исследования проводились А.С. Вавакиным, Р.А. Васиным, В.В. Викторовым и др. под руководством Р.А. Васина на тонкостенных цилиндрических образцах из стали 45 под действием осевой силы, крутящего момента и внутреннего давления.

На рисунках 19-21 показано изменение компоненты S_1 вектора напряжений вдоль длины траектории деформаций для винтовой траектории постоянной кривизны и кручения, на рисунках 22-24 – скалярные свойства. На рисунках 25-27 приведено изменение компоненты S_1 вектора напряжений вдоль длины траектории деформаций для винтовой траектории переменной кривизны и кручения, на рисунках 28-30 – скалярные свойства. На всех рисунках экспериментальные результаты показаны светлыми кружками, а расчетные – сплошными, пунктирными и штриховыми кривыми.

Винтовые траектории деформаций постоянной кривизны и кручения ($\chi=200$, $\tau=200$)

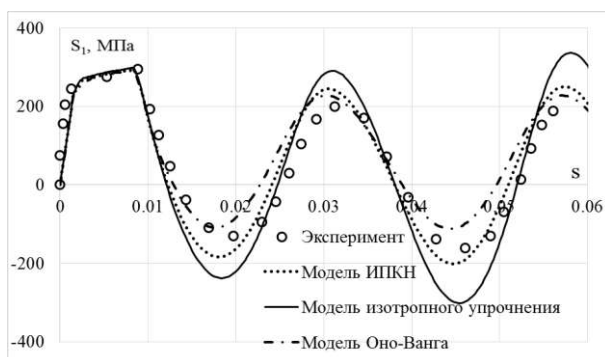


Рис. 19

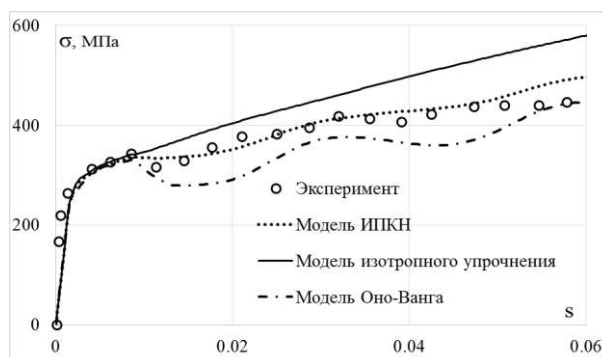


Рис. 22

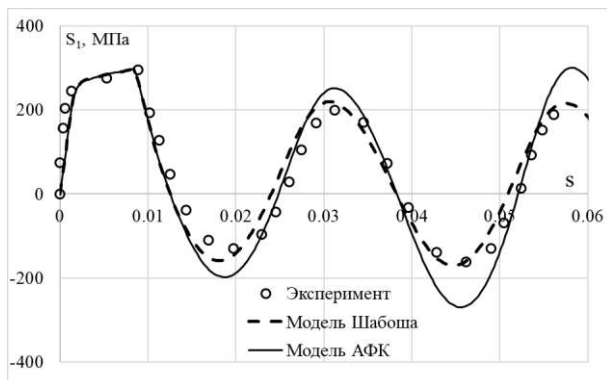


Рис. 20

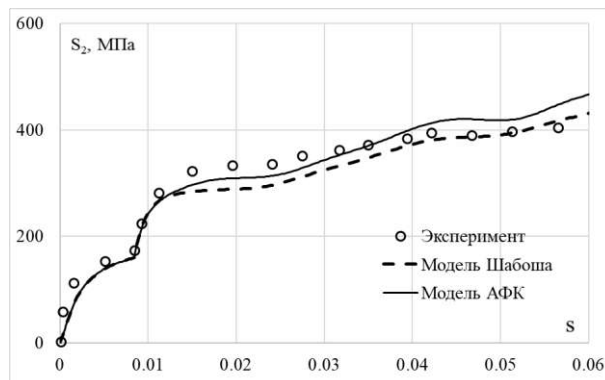


Рис. 23

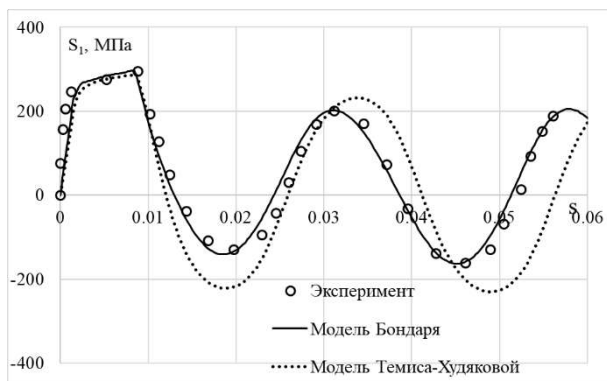


Рис. 21

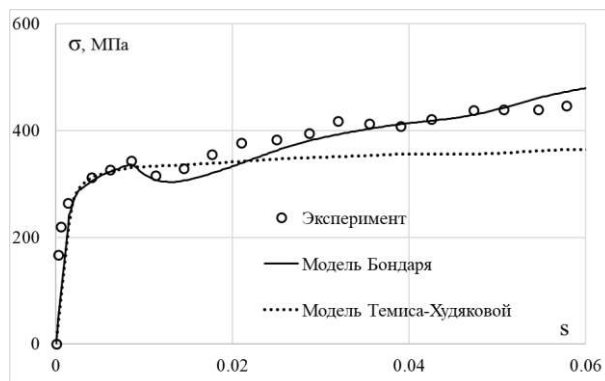


Рис. 24

Винтовые траектории деформаций переменной кривизны и кручения ($\chi \in [150, 370]$, $\tau \in [50, 100]$)

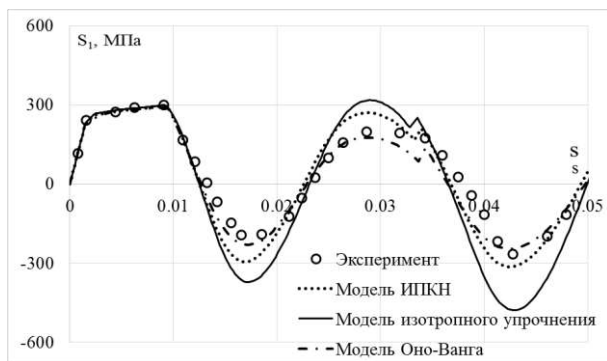


Рис. 25

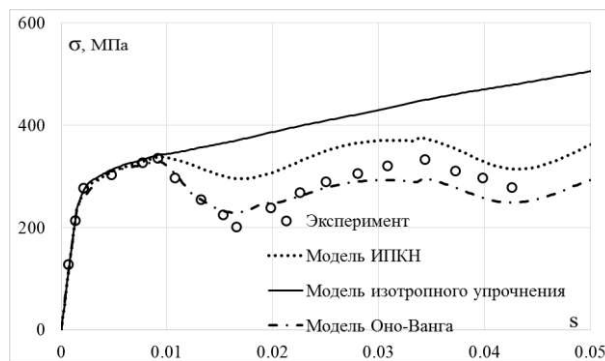


Рис. 28

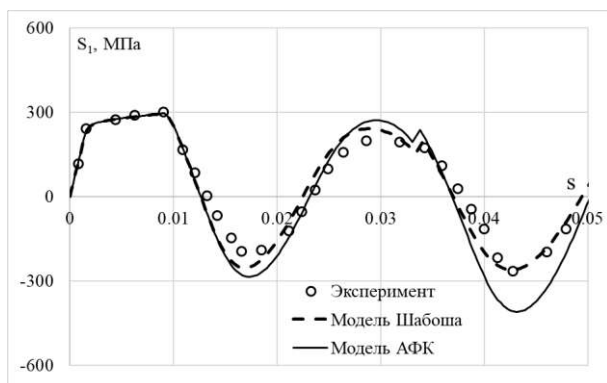


Рис. 26

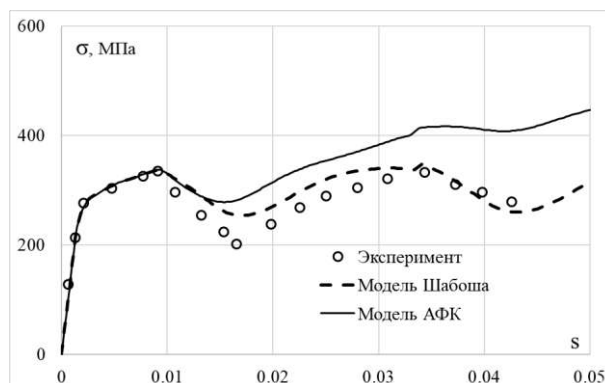


Рис. 29

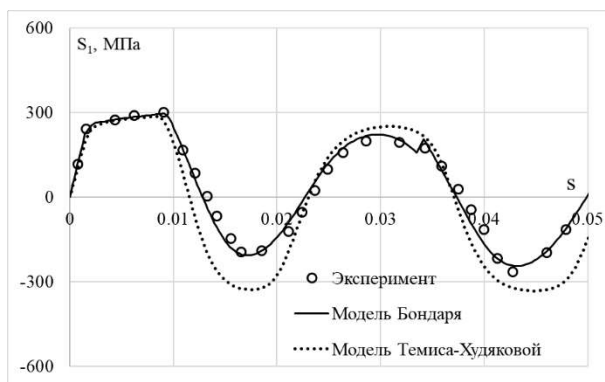


Рис. 27

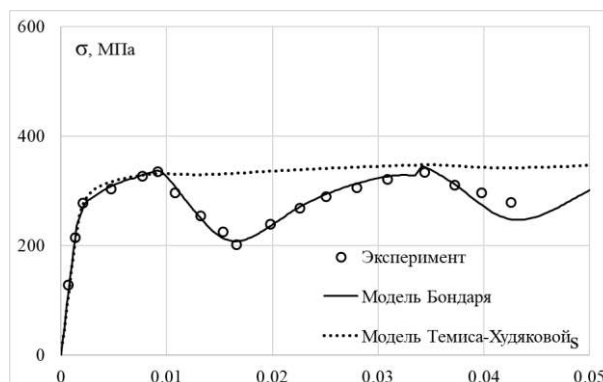


Рис. 30

Сравнительный анализ показал, что по всем рассмотренным плоским и пространственным траекториям деформаций удовлетворительное соответствие эксперименту достигается на основе моделей Шабоса и Бондаря при лучшем соответствии эксперимента модели Бондаря.

В четвертой главе рассматриваются теории пластичности, анализируемые при несимметричных и нестационарных циклических нагружениях. С учетом результатов сравнительного анализа вариантов теорий при непропорциональном нагружении по плоским и пространственным траекториям деформаций для анализа теорий при несимметричных циклических нагружениях были выбраны следующие модели: модель Армстронга-Фредерика-Кадашевича; модель Шабоса с тремя и четырьмя эволюционными уравнениями для микронапряжений; модель Бондаря; модифицированная модель Бондаря с учетом и без учета микронапряжений Оно-Ванга. Основные уравнения рассматриваемых моделей пластичности аналогичны представленным уравнениям в первой главе. В модели Армстронга-Фредерика-Кадашевича микронапряжения описываются с помощью эволюционного уравнения (12). В модели Шабоса для описания анизотропного упрочнения используется принцип суммирования микронапряжений (10), каждое микронапряжение описывается уравнением (11), рассматривается два варианта модели при $M = 3$ и $M = 4$. Модель Бондаря используется в трех вариантах: модель с трехчленной структурой уравнения для микронапряжений (13); модель, обобщенная на процессы вышагивания и посадки петли пластического гистерезиса; модель со сложной структурой уравнений для микронапряжений, включающая в себя три типа микронапряжений.

Для варианта модели Бондаря, обобщенного на процессы вышагивания и посадки петли пластического гистерезиса, параметр E_a принимается зависящим от накопленной пластической деформации:

$$E_a = \frac{E_{ao}}{1 + K_E (\varepsilon_{u*}^p)^{n_E + 1}}, \quad (20)$$

здесь E_{ao}, K_E, n_E – параметры материала, дополняющие материальные функции модели Бондаря и замыкающие модифицированную модель.

Базовым экспериментом для идентификации материальных функций для всех представленных моделей являются испытания по циклическому растяжению-сжатию при жестком несимметричном цикле, со средним значением деформации не менее 0,03.

Далее в работе приводится описание моделирования процессов при жестких (задается скорость осевой деформации $\dot{\varepsilon}_{11}$ от t) и мягких (задается скорость осевого напряжения $\dot{\sigma}_{11}$ от t) одноосных несимметричных циклических нагружений.

Пятая глава посвящена сравнительному анализу теорий пластичности при пропорциональных циклических нагружениях. Были проведены испытания при несимметричном деформировании, включающие в себя этапы монотонного и циклического нагружения. Материал экспериментальных исследований – нержавеющая сталь 12X18H10T.

Испытания проведены на универсальной испытательной машине Zwick Z100. Геометрия и размеры испытанных образцов соответствуют требованиям стандарта ASTM E606. Диаметр рабочей части образца 8 мм, длина 24 мм, радиусы перехода от рабочей к захватной части 32 мм.

Деформация в процессе испытания измерялась и контролировалась по навесному экстензометру с измерительной базой 10 мм. Погрешность измерения осевой силы составляет 1% и осевого перемещения также 1%. В первом эксперименте реализуется жесткое нагружение (нагружение при задаваемом значении изменения осевой деформации). Деформирование образца осуществляется при комнатной температуре со скоростью равной 0.5 %/с.

В случае жесткого нагружения эксперимент включал в себя пять этапов монотонных и циклических нагружений. На рисунке 31 приведена экспериментальная диаграмма деформирования образцов из нержавеющей стали 12X18H10T. На циклических диаграммах первого, третьего и пятого этапов показаны петли пластического гистерезиса для первого и последнего циклов нагружения.

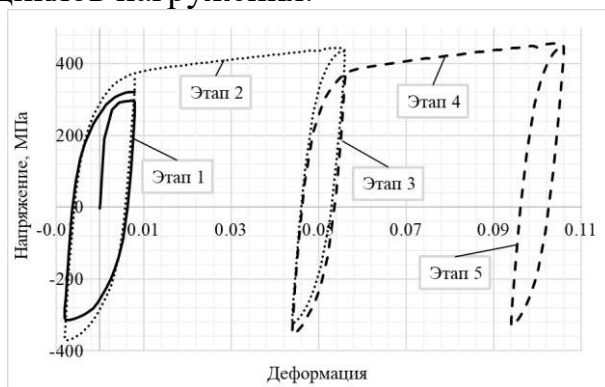


Рис. 31

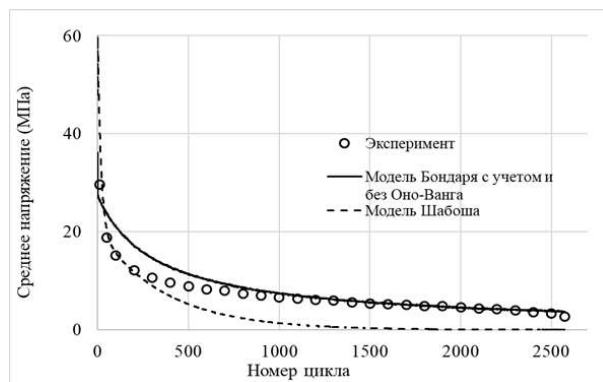


Рис. 32

Для сравнительного анализа моделей пластичности на основе разработанной программы проведен расчет экспериментов на жесткое циклическое нагружение стали 12X18H10T. На рисунке 32 показана посадка петли пластического гистерезиса на пятом этапе нагружения. Экспериментальные результаты показаны светлыми кружками, а расчетные – сплошной и штриховой кривыми.

Приведенные выше результаты исследований показывают достаточную адекватность модифицированной модели Бондаря для описания несимметричных жестких циклических процессов нагружения. Следует отметить, что для описания жестких процессов нагружения можно использовать модифицированную модель Бондаря и без учета микронапряжений Оно-Ванга.

Далее рассматриваются испытания при мягком несимметричном циклическом нагружении. Материал экспериментальных исследований – нержавеющая сталь 12X18H10T.

Эксперимент включает в себя пять этапов монотонных и циклических нагружений. На каждом этапе реализуется по 20 циклов нагружения. На рисунке 33 приведена экспериментальная диаграмма деформирования образцов из нержавеющей стали 12X18H10T для первых трех этапов нагружения. На всех этапах, кроме первого, происходит вышагивание петли пластического гистерезиса.

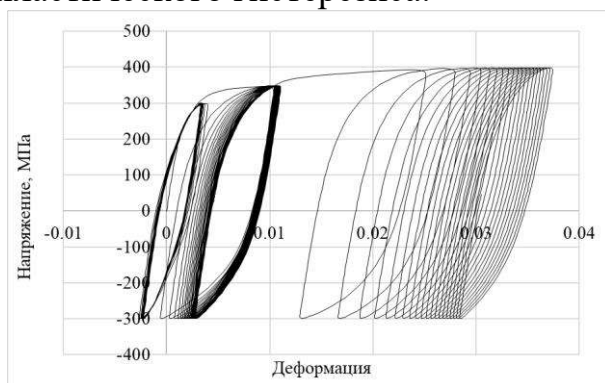


Рис. 33

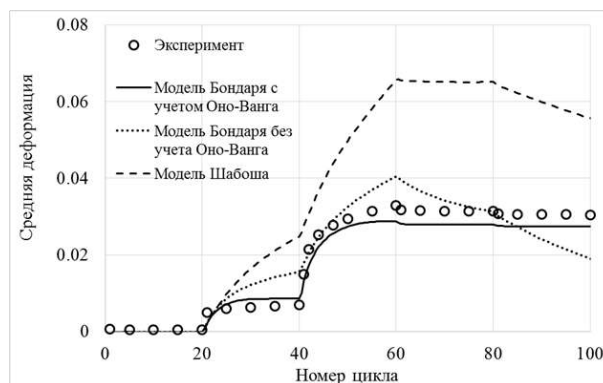


Рис. 34

Для сравнительного анализа моделей пластичности на основе разработанной программы проведен расчет эксперимента на мягкое несимметричное циклическое нагружение стали 12X18H10T. На рисунке 34 приведены результаты расчета и эксперимента изменения средней деформации цикла в процессе мягкого циклического нагружения.

В диссертации так же приведены результаты расчетов экспериментов для стали 12X18H9 – жесткое несимметричное циклическое нагружение с посадкой петли пластического гистерезиса и стали SS304 – мягкое несимметричное циклическое нагружение с вышагиванием петли пластического гистерезиса.

Анализ результатов исследований показывает, что модифицированная модель Бондаря, учитывающая микронапряжения Оно-Ванга, может адекватно описывать процессы несимметричного мягкого циклического

нагружения, состоящего из блоков с возрастающей и убывающей асимметрией циклов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе

1. По результатам проведенного анализа исследований в области моделирования процессов циклического упругопластического деформирования выбраны математические модели, основанные на теории пластического течения и применяемые в практических расчетах конструкций.

2. Описаны методы идентификации материальных параметров по диаграммам растяжения, растяжения после предварительного сжатия и циклическим диаграммам петель пластического гистерезиса для всех рассматриваемых вариантов теорий пластичности, получены материальные функции конструкционных сплавов 40X16H9Г2С, 9Х2, ст. 45, 12Х18Н9, 12Х18Н10Т, SS304.

3. Для проведения расчета кинетики напряженно-деформированного состояния по всем моделям пластичности была разработана программа на языке программирования Fortran-95. В основе программы лежит метод решения системы дифференциальных уравнений Рунге-Кутты 4 порядка для решения задачи Коши.

4. Проведено сравнение результатов расчета кинетики напряженно-деформированного состояния с помощью моделей: модели изотропного упрочнения, модели Ишлинского-Прагера-Кадашевича-Новожилова, модели Армстронга-Фредерика-Кадашевича, модели Оно-Ванга, модели Шабоса, модели Бондаря и модели Темиса-Худяковой с результатами экспериментов при непропорциональном нагружении по плоским траекториям деформаций в виде многосвязных ломаных, криволинейных траекториях постоянной и переменной кривизны и так же по пространственным траекториям деформаций в виде винтовых линий постоянной и переменной кривизны и кручения. Сравнение проведено по ответным траекториям напряжений, скалярным и векторным свойствам.

5. Удовлетворительное соответствие эксперименту при непропорциональном нагружении по всем рассмотренным плоским и пространственным траекториям деформаций достигается при расчетах на основе моделей Шабоса и Бондаря – отличие результатов расчетов и экспериментов не превышает 30% при лучшем соответствии экспериментам модели Бондаря. Следует так же отметить, что для описания анизотропного упрочнения для модели Шабоса требуется шесть материальных параметров, а для модели Бондаря всего три.

6. Проведены эксперименты по пропорциональному одноосному несимметричному циклическому нагружению как в условиях жесткого, так и мягкого режимов нагружений. В этих экспериментах имеют место эффекты посадки и вышагивания петли пластического гистерезиса.

7. Проведены расчеты пропорционального одноосного несимметричного циклического нагружения с помощью модели Армстронга-

Фредерика-Кадашевича, модели Шабоса с тремя и четырьмя эволюционными уравнениями для микронапряжений, модели Бондаря и модифицированной модели Бондаря с учетом и без учета микронапряжений Оно-Ванга. Результаты расчетов сравниваются с результатами экспериментов по зависимостям средних значений деформаций или напряжений цикла от номера цикла.

8. Показано, что модифицированная модель Бондаря наиболее адекватно по сравнению с другими моделями описывает кинетику напряженно-деформированного состояния в условиях несимметричных циклических процессов одноосного нагружения.

В приложении А помещен текст кода программы для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в перечень изданий, утвержденный ВАК

1. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Теории пластичности при циклических нагружениях // Проблемы прочности и пластичности. – 2018 – № 1 С. 31–40.

Статьи, входящие в издания, индексируемые в базе Scopus

2. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. A variant of the thermoplasticity theory for monotonic and cyclic processes of nonisothermal loads // PNRPU Mechanics Bulletin. 2020. № 2. pp. 28-36.

3., Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. Theories of plasticity under complex loading along flat trajectories of deformations // PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 3, pp. 35-47.

4. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. Theories of plasticity under complex loading along spatial trajectories of deformations // PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 4, pp. 41-48.

Материалы докладов на научных конференциях

5. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Теории пластичности при циклических нагружениях // Материалы XXIX Международной конференции «Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов». М.: ИМАШ РАН. 2018 г. С. 133-136.

6. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Сравнительный анализ теорий пластичности при циклических нагружениях // Материалы XXX Всероссийской школы-конференции Математическое моделирование в естественных науках. Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2021. С. 9-11.