Федоренко, Р.В. О влиянии механизма упрочнения на приспособляемость сосуда под давлением в условиях термоциклического нагружения / Р.В. Федоренко, А.В. Лукин, И.Р. Муртазин. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.09 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 1. – С. 117–128.

Perm Polytech Style: Fedorenko R.V., Lukin A.V., Murtazin I.R. The Hardening Type Influence of Pressure Vessel Ratcheting in Case of Thermal Cyclic Loads. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 1, pp. 117-128. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.09

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.09
УДК 004.942 + 539.3 + 621.039

О ВЛИЯНИИ МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ НА ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ СОСУДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Р.В. Федоренко, А.В. Лукин, И.Р. Муртазин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 04 февраля 2025 г.
Одобрена: 02 марта 2025 г.
Принята к публикации:
28 марта 2025 г.

Ключевые слова:

приспособляемость, рэтчетинг, приработка, циклическое нагружение, сосуд под давлением, термоциклические нагрузки, пластические деформации, атомные станции, диаграмма Бри.

АННОТАЦИЯ

В классических трудах по исследованию приспособляемости сосуда под давлением в условиях термоциклического нагружения материал конструкции принимается упругопластическим без упрочнения (идеальная пластичность). Решение задачи в данной постановке может быть получено аналитически и, как правило, приводится в виде так называемой «диаграммы Бри», построенной в осях механических и тепловых напряжений.

В то же время поведение реального материала в условиях циклического термосилового нагружения требует применения математических моделей изотропного, кинематического или смешанного изотропно-кинематического упрочнения, что оказывает значительное влияние на приспособляемость конструкции.

Современные отечественные и зарубежные нормы проектирования (ПНАЭ, ГОСТ 59115, ASME, RCC-MR) высокотемпературных реакторных установок атомных станций (реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы и др.) допускают возникновение пластических деформаций в материале, но ограничивают уровень их накопления в течение всего жизненного цикла конструкции. В частности, действующие стандарты регламентируют использование как упрощенной методики, основанной на классическом решении Бри для идеально пластического материала, так и прямого конечно-элементного расчета жизненного цикла конструкции в условиях пластического деформирования и высокотемпературной ползучести.

В настоящей работе рассматривается задача о термоциклическом нагружении сосуда под давлением с применением различных моделей упрочнения. Разработан численный алгоритм построения и анализа эволюции диаграмм приспособляемости в зависимости от числа циклов нагружения. Проводится конкретный числовой расчет процесса циклического термосилового нагружения сосуда под давлением, изготовленного из стали с известными параметрами моделей упругопластического деформирования в контексте прогнозирования ресурса конструкции на основе действующих норм и правил проектирования корпусов и оборудования реакторных установок.

© **Федоренко Роман Валерьевич** – инженер-исследователь, ассистент, e-mail: fedorenko_rv@spbstu.ru.
Лукин Алексей Вячеславович – к. ф.-м. н., доц., e-mail: lukin_av@spbstu.ru.
Муртазин Ильнар Робертович – инженер-исследователь, ассистент, e-mail: murtazin_ir@spbstu.ru.

Roman V. Fedorenko – Research Engineer, Assistant, e-mail: fedorenko_rv@spbstu.ru.
Alexey V. Lukin – PhD, Lecturer, e-mail: lukin_av@spbstu.ru.
Ilnar R. Murtazin – Research Engineer, Assistant, e-mail: murtazin_ir@spbstu.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE HARDENING TYPE INFLUENCE OF PRESSURE VESSEL RATCHETING IN CASE OF THERMAL CYCLIC LOADS

R.V. Fedorenko, A.V. Lukin, I.R. Murtazin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 04 February 2025
Approved: 02 March 2025
Accepted for publication:
28 March 2025

Keywords:

ratcheting, shakedown, plastic cycling, cyclic loads, pressure vessel, thermal cyclic loads, plastic strain, nuclear power plant, Bree diagram.

ABSTRACT

Classical studies of the ratcheting of pressure vessels under thermocyclic loading assume that the structural material is elastic-plastic without hardening (ideal plasticity). This allows for an analytical solution to the problem, which is typically presented in the form of a "Brie diagram" plotted on the axes of mechanical and thermal stresses. The actual behavior of a material under cyclic thermo-mechanical loading requires more complex mathematical models that consider isotropic, kinematic, or mixed isotropic-kinematic hardening effects. These additional factors significantly affect the adaptability characteristics of the structure. Modern Russian and international design standards (PNAE, GOST, ASME, RCC-MR) for nuclear power plant reactor installations (reactors using liquid metal coolants, high-temperature gas-cooled reactors, etc.) allow for the occurrence of plastic deformation in the material but limit the accumulation of these deformations over the lifespan of the structure. Specifically, these standards regulate the use of both a simplified method based on the classic Bree solution for perfectly plastic materials and a direct finite element analysis of the structural life cycle under conditions of plastic deformation and high-temperature creep. In this paper, we investigate the problem of thermal cycling of a pressure vessel using different hardening models. We have developed a numerical algorithm to construct and analyze the evolution of adaptation diagrams depending on the number of cycling loads. We perform a specific numerical calculation for the cyclic thermal force loading of a steel pressure vessel with known parameters for elastic-plastic deformation models. This is done in the context of predicting the design life based on current regulations and standards for the design of nuclear power plant equipment.

Введение

В настоящее время передовым направлением российской атомной промышленности является создание замкнутого топливного цикла, сердцем которого должен служить высокотемпературный реактор с жидкометаллическим теплоносителем [1]. Особенность работы подобных реакторов состоит в высоких уровнях механических и температурных нагрузок на корпус реакторной установки, а также циклический характер этих нагрузок в течение эксплуатации энергоблока.

Еще одним ключевым направлением современной отечественной и мировой энергетики является замещение ископаемого топлива в различных высокотемпературных промышленных технологиях. С этой целью активно ведутся разработки отечественного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) с гелиевым теплоносителем, в результате работы которого может быть получено экологически чистое водородное топливо [2]. Разработки такого типа реактора начались в 60-х гг. XX в. в СССР, но до практической реализации доведены не были. Основными преимуществами данного реактора является высокая степень безопасности: нет риска возникновения пароциркониевой реакции, так как в конструкции микротвэлов не используются сплавы с цирконием, а в активной зоне нет воды. Однако в связи с высокой рабочей температурой реактора (более 800 °C) проблемы эксплуатации материалов и расчетного обоснования прочности подобных ответственных конструкций не теряют своей актуальности.

Современные нормы проектирования атомных станций [3; 4] допускают оценку циклической прочности конструкций в условиях неупругого поведения. Упрощенные методики расчета позволяют с определенной степенью консерватизма определять возможность эксплуатации конструкции под действующими проектными нагрузками. Данные методики построены на применении диаграммы Бри [5] для определения характерной приспособляемости сосуда под давлением к термоциклическому нагружению. При таком подходе неупругое поведение материала описывается соотношениями идеальной пластичности.

В случае неудовлетворения критериям циклической прочности по упрощенным методиками допускается проведение последовательных циклических расчетов с учетом нелинейной диаграммы деформирования материала с упрочнением, в результате которых определяется величина накопленной неупругой деформации, которая ограничена нормативными допускаемыми величинами.

Однако нормативные документы не регламентируют тип механизма упрочнения, который должен быть заложен в расчетной модели, что имеет значительное влияние на итоговые величины накопленной неупругой деформации. Настоящая работа посвящена описанию влияния механизма упрочнения материала на приспособляемость сосуда под давлением в условиях термоциклического нагружения. Исследование проводится с применением программного средства конечно-элементного анализа *Abaqus*.

Механизмы упрочнения материала

Существует три базовых механизма упрочнения: изотропное, кинематическое и смешанное. При циклическом нагружении в случае изотропного упрочнения поверхность текучести изменяет свой радиус при неизменном положении центра в пространстве напряжений. В случае кинематического упрочнения центр поверхности текучести перемещается в пространстве напряжений, но радиус поверхности при этом не меняется (рис. 1) [6; 7].

Видно, что в случае изотропного упрочнения наблюдается значительное увеличение зоны упругого поведения материала (упрочненного) при втором и последующих циклах нагружения, чего не происходит в случае кинематического упрочнения.

В реальном материале наблюдается смешанный механизм, который содержит особенности как кинематического, так и изотропного упрочнения [6; 7]. Сложность использования данного механизма упрочнения в расчетных моделях заключается в необходимости определения параметров составляющих изотропного и кинематического упрочнения на базе ряда натурных испытаний, которые не всегда имеются в распоряжении исследователя для некоторых материалов. Тем не менее для различных марок сталей, из которых выполняются конструктивные элементы реакторов и оборудования атомных станций, известно большое число опубликованных исследований, например [8–13].

Для описания процессов неупругого поведения материала принято использовать закон изменения поверхности текучести Мизеса [15]. Данная модель является наиболее распространенной, используется в опорных для данной работы источниках [8–13] и реализована в большинстве программных комплексов конечно-элементного анализа.

Поверхность Мизеса описывается соотношением:

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{X}) : (\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{X})} - R - \sigma_{y,0} = 0, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}'$ – девиатор тензора напряжений, $\sigma_{y,0}$ – начальный предел текучести материала, $\boldsymbol{X}$ и R – переменные, описывающие эффекты кинематического и изотропного упрочнения соответственно.

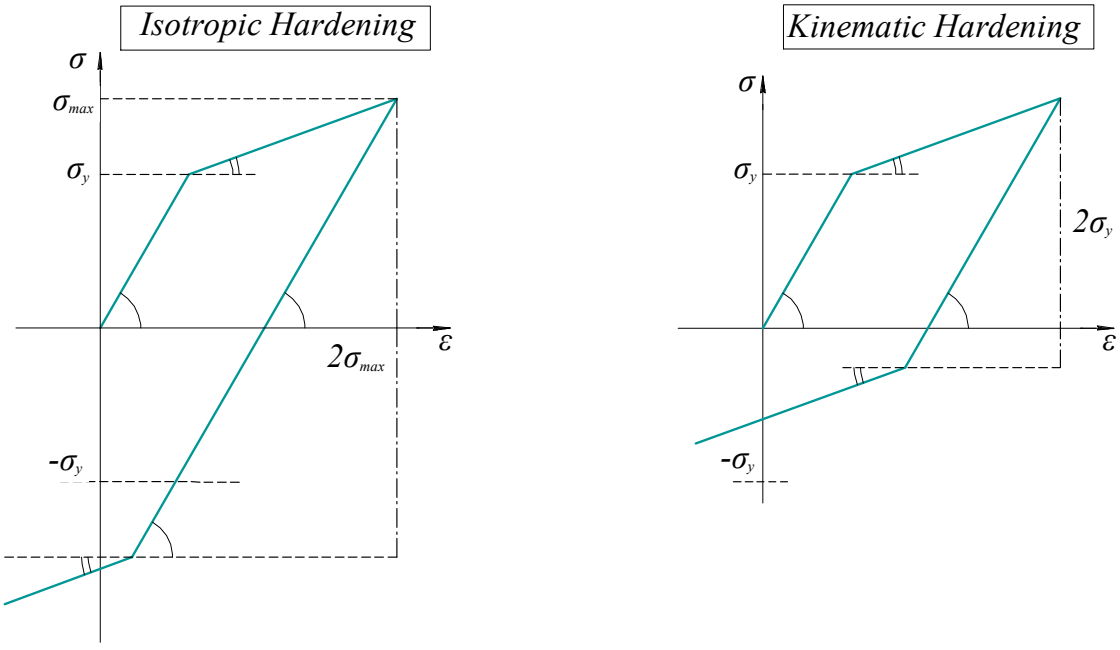
Для изотропной составляющей упрочнения закон изменения формы поверхности текучести может быть описан с помощью соотношения в форме закона нелинейного изотропного упрочнения Войса [10]:

$$\dot{R} = \sum_{i=1}^{Z} \dot{R}_i, \; \dot{R}_i = b_i \left(R_{\infty,i} - R_i \right) \dot{p}, \qquad (2)$$

где $R_{\infty,i}$ – напряжение насыщения, b_i – скорость выхода на напряжение, p – накопленная пластическая деформация.

Данная форма позволяет с помощью разложения на несколько компонент более точно описывать кривую составляющей изотропного упрочнения. При интегрировании соотношение преобразуется в:

$$R = \sum_{i=1}^{Z} R_{\infty,i} \left(1 - e^{-b_i p} \right). \qquad (3)$$



a *b*

Рис. 1. Механизмы упрочнения на примере одноосного растяжения – сжатия: *a* – изотропное упрочнение; *b* – кинематическое упрочнение

Fig. 1. Hardening types in one dimension case: *a* – isotropic hardening; *b* – kinematic hardening

В инженерной практике обычно используют одну компоненту ($Z=1$), тогда:

$$R = R_{\infty}\left(1-e^{-bp}\right). \tag{4}$$

В этом случае R_{∞} приобретает однозначный физический смысл – значение асимптоты радиуса поверхности текучести.

Для описания кинематической составляющей упрочнения принято использовать модель Шабоша [15–17], которая может быть представлена в виде соотношений

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \sum_{i=1}^{M}\dot{\boldsymbol{X}}_i,\ \dot{\boldsymbol{X}}_i = \frac{2}{3}C_i\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{pl} - \gamma_i\boldsymbol{X}_i\dot{p}, \tag{5}$$

где C_i – модуль упрочнения, γ_i – параметр восстановления, определяющий скорость, с которой модуль упрочнения начинает уменьшаться по мере увеличения накопленной пластической деформации.

Первое слагаемое данного соотношения описывает линейную составляющую кинематического упрочнения по закону Прагера, второе слагаемое описывает мгновенную память формы (*evanescent strain memory*) [15].

Накопленная пластическая деформация p связана с пластической деформацией $\boldsymbol{\varepsilon}_{pl}$ по закону [15]:

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{pl} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{pl}}, \tag{6}$$

$\boldsymbol{X}$ в общем случае, является тензором второго ранга обратных напряжений [18], который в английской литературе имеет название *back stress tensor*. Интегрирование выражения (5) в одномерном случае приводит к виду:

$$X = \sum_{i=1}^{M}\left[\zeta\frac{C_i}{\gamma_i} + \left(X_{i,0} - \zeta\frac{C_i}{\gamma_i}\right)e^{-\zeta\gamma_i\left(\varepsilon_{pl}-\varepsilon_{pl,0}\right)}\right], \tag{7}$$

где ζ – коэффициент, принимающий значение «1» и «-1» для зоны нагрузки и разгрузки, $X_{i,0}$ и $\varepsilon_{pl,0}$ – значения начальных напряжений и деформаций.

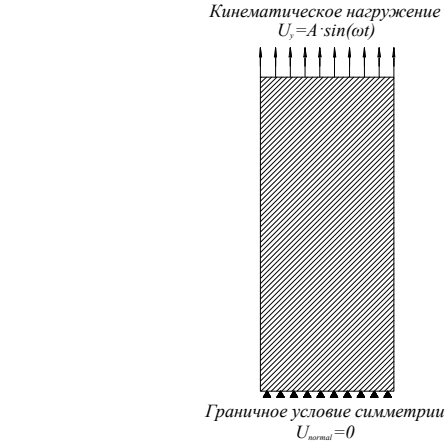
Современные программные средства численного моделирования (*Ansys, Abaqus, LS-Dyna*) используют модель смешанного упрочнения при $Z=1$ и произвольном M [19–21].

Одноосное циклическое растяжение – сжатие образца

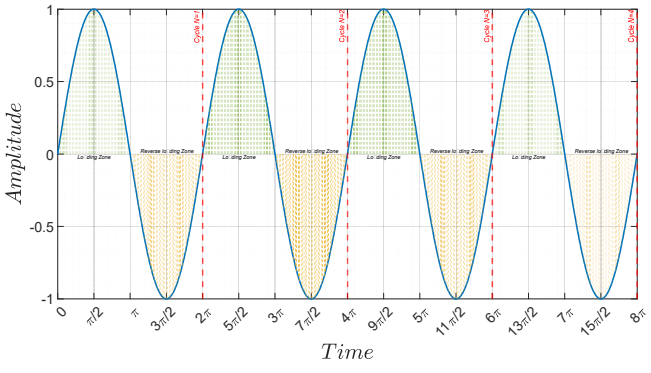
Верификация численной процедуры для корректного задания упрочнения в материале под действием циклических нагрузок проводится на базе решения задачи одноосного растяжения – сжатия образца в течение нескольких циклов нагружения. Проводится анализ влияния механизма упрочнения на результирующие диаграммы деформирования. В качестве эталонного источника принимается [12].

В названной работе рассматриваются образцы из стали SA312 TP316. Схожие марки стали по своим характеристикам применяются в элементах высокотемпературных реакторов и сосудов под давлением. В статье [12] проведены экспериментальные исследования по получению монотонной кривой растяжения образца до разрыва и циклические испытания образцов. На базе данных исследований предложены параметры смешанного упрочнения, составляющая кинематического упрочнения которой задана по модели Шабоша [15–17].

Проведение численной верификации проводится в программном средстве *Abaqus*, в котором заложена аналогичная модель Шабоша [20]. Постановка задачи представлена на рис. 2. U_y на рисунке обозначает вертикальную (в направлении стрелок) компоненту вектора перемещений образца, U_{normal} – нормальную к поверхности составляющую вектора перемещений.



a



b

Рис. 2. Постановка задачи в программном средстве *Abaqus:* *a* – схема нагружения модельного образца; *b* – временная зависимость изменения амплитуды кинематического нагружения

Fig. 2. Statement of the problem in *Abaqus* software: *a* – loading scheme, *b* – time dependence of the change in the amplitude of kinematic loading

На базе исследования [12] для модели смешанного упрочнения выбираются параметры, представленные в таблице.

Параметры модели Шабоша ([12, табл. 4])

Chaboche model parameters ([12, Table 4])

σ_0, МПа	C_1, МПа	γ_1	C_2, МПа	γ_2	C_3, МПа	γ_3	R_∞, МПа	b
116	114783	2000	29935	262	1049	2	178	5.76

Для случая одноосного растяжения в зоне нагрузки на первом цикле нагружения различий в механизмах упрочнения нет, поскольку влияние механизма упрочнения реализуется при смене знака нагружения и повторном нагружении. Подобранные коэффициенты, представленные в таблице, должны в данной зоне в точности совпадать с принимаемой кривой деформирования. На рис. 3 представлено изображение нормативной кривой деформирования и обратных напряжений X для отражения их взаимной зависимости. Анализ соотношения (7) показывает, что уровень напряжений X ниже уровня полных напряжений на величину предела текучести $\sigma_{y,s}$, что отражено на графике.

На рис. 4 представлены результаты анализа одноосного растяжения (без циклического нагружения) для различных механизмов упрочнения в сравнении с принимаемой кривой деформирования.

Отличие представленных кривых наблюдается из-за различных способов задания механизмов упрочнения в программном средстве *Abaqus* и некоторой погрешности в процессе определения параметров, что не влияет на точность общих результатов расчета.

Для демонстрации отличия работы различных механизмов упрочнения необходимо проводить циклическое нагружение с фазами нагрузки и разгрузки. Результаты такого исследования приведены на рис. 1, где представлены 1-й, 2-й и 5-й расчетные циклы. Один цикл включает в себя фазу нагрузки, разгрузки и нагрузки с обратным знаком до того же амплитудного значения.

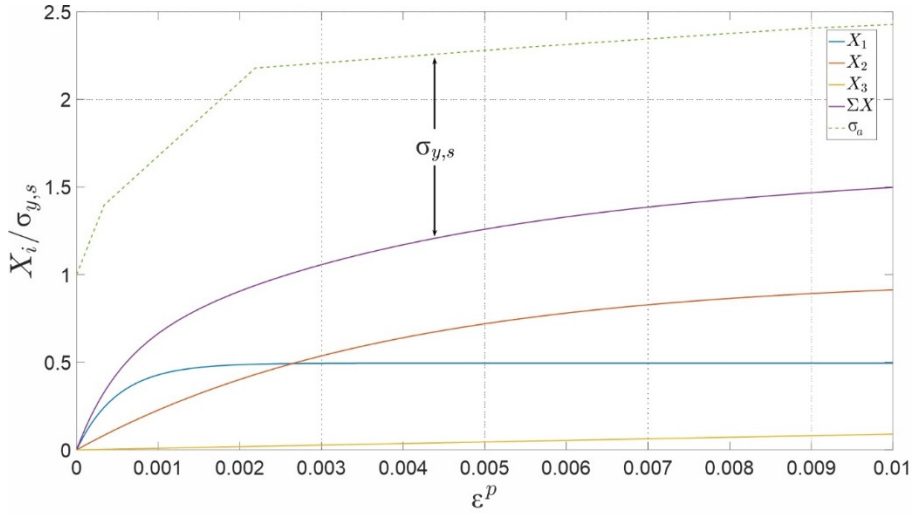
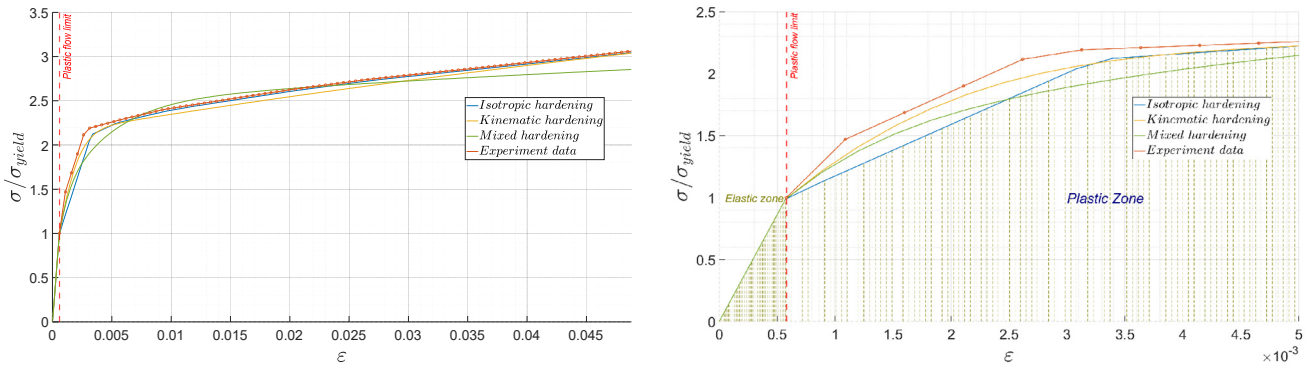


Рис. 3. Составляющая обратных напряжений в общей кривой деформирования

Fig. 3. Back stresses and material stress-strain curve



a *b*

Рис. 4. Одноосное растяжение образца: *a* – полные кривые деформирования; *b* – детальное изображение в зоне перехода в пластичность

Fig. 4. One dimension tension: *a* – full stress-strain curves; *b* – detailed zone of plasticity initiation

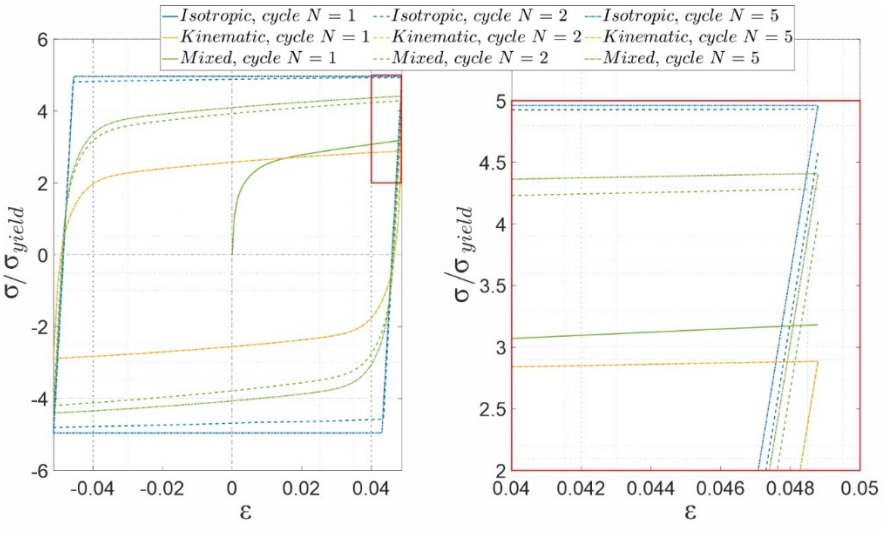


Рис. 5. Диаграммы деформирования, циклическое нагружение

Fig. 5. Cyclic strain-stress curves

Результаты показывают известную особенность работы различных механизмов упрочнения:

- изотропное упрочнение цикл за циклом увеличивает ширину гистерезисной кривой, которая равна удвоенному значению текущего предела текучести. Данный рост будет продолжаться бесконечно, если модель материала не подразумевает наличие точки разрушения образца;
- кинематическое упрочнение во время всего циклического нагружения не меняет ширину гистерезисной кривой, смещение центра поверхности текучести в пространстве напряжений происходит на первом цикле и больше не меняется;
- смешанное упрочнение содержит в себе особенности каждого из механизмов – составляющая изотропного упрочнения позволяет учитывать увеличение размера поверхности текучести, за счет чего возрастает ширина гистерезисной кривой, а составляющая кинематического упрочнения не позволяет имеет бесконечный рост данной кривой (в системе присутствует напряжение насыщения, *saturated stress*).

Влияние механизма упрочнения на характер приспособляемости сосуда под давлением

Классические работы по оценке приспособляемости сосуда под давлением [5; 22–31] построены в основном на модели идеальной пластичности для получения аналитических зависимостей. Выделяются серии работ исследователей из университета Мичиган [32; 33], которые рассматривают задачу приспособляемости сосуда под давлением в условиях нелинейной диаграммы деформирования материала с учетом упрочнения. Работа [32] посвящена исследованию влияния моделей описания кинематического упрочнения на общую приспособляемость сосуда, работа [33] – процедуре оценки приспособляемости сосуда с учетом нелинейной упрочняющейся модели материала. Однако в данных работах не представлено исследование для смешанного механизма.

Базовые аспекты задачи оценки приспособляемости представлены в работах [5] и [34]. В последней из них описан процесс верификации автоматизированной процедуры на базе программного средства *Abaqus*, которая позволяет строить диаграммы Бри для сосуда под давлением при варьировании различных параметров. Для представляемого в данной работе исследования в процедуру вносятся параметры материала, описанные ранее, с целью анализа влияния механизма упрочнения на общую приспособляемость сосуда. Постановка задачи представлена на рис. 6: рассматривается сосуд под постоянным внутренним давлением, нагруженный циклически меняющимся градиентом температуры по толщине стенки.

Классическая диаграмма Бри для оригинальной задачи [5] представлена на рис. 7. Данная диаграмма получена в условиях идеально пластичного материала без упрочнения под действием описанных ранее нагрузок [34].

Линиями на диаграмме нанесено аналитическое решение для границ зон характерной приспособляемости из [5]. На дальнейших диаграммах данные линии также будут отражены для отслеживания эволюции исходной диаграммы при наличии упрочнения. Каждая из зон определяет свое характерное поведение материала [34]:

- зона E соответствует полностью упругому состоянию конструкции;
- в зонах S_1, S_2 – приспособляемость, упругая приспособляемость, приработка (*elastic* или *strict shakedown*). Такое поведение материала выражается в возникновении пластической деформации на первом цикле теплового нагружения и ее дальнейшей неизменности на протяжении жизненного цикла конструкции;

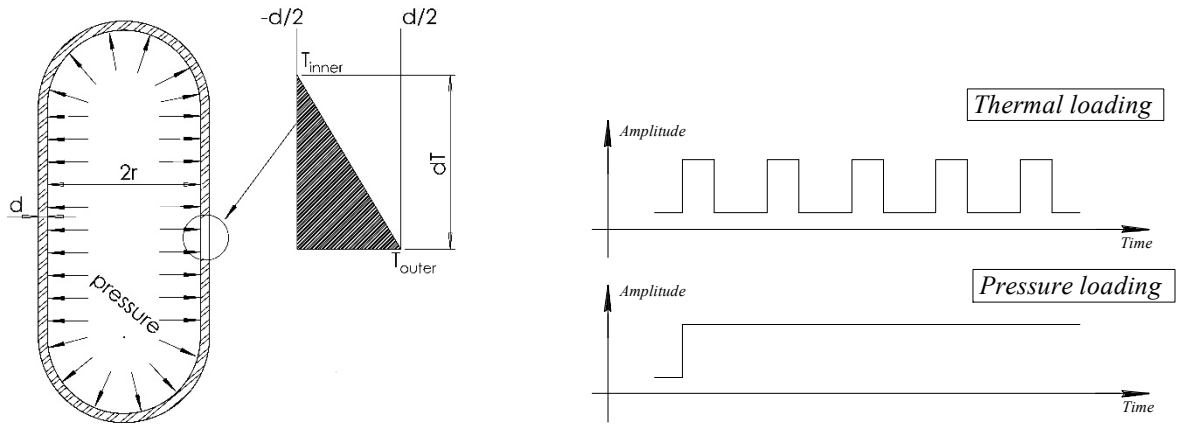


Рис. 6. Постановка задачи оценки приспособляемости

Fig. 6. Ratcheting test problem statement

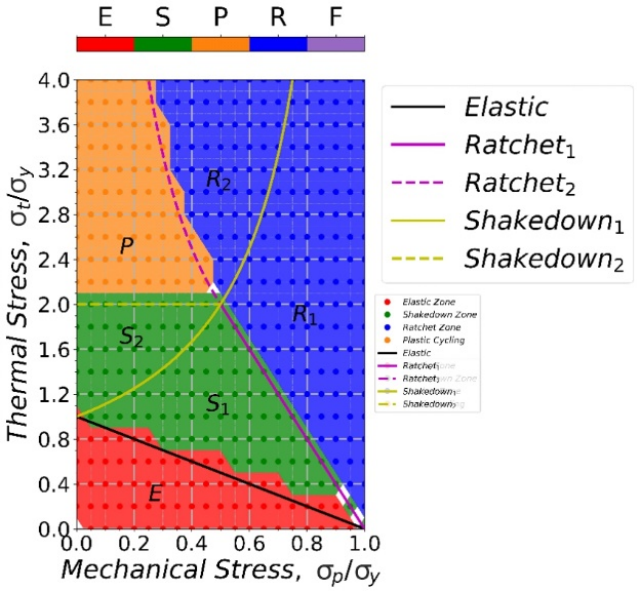


Рис. 7. Классическая диаграмма Бри

Fig. 7. Bree diagram

- в зоне P – знакопеременная пластичность, знакопеременное неупругое деформирование (*plastic cycling* или *global shakedown*), для которых характерно циклическое изменение пластической деформации в процессе расчета вокруг некоторого среднего значения, которое остается неизменным. Приращение пластической деформации от цикла к циклу отсутствует;
- в зонах R_1, R_2 – рэтчетинг, непрекращающееся знакопеременное течение, прогрессирующая деформация (*ratcheting*) – неограниченный рост пластических деформаций под действием циклических нагрузок (от цикла к циклу существует ненулевое приращение пластической деформации).

Важно отметить, что для упругоидеального пластического материала диаграмма Бри имеет одинаковый вид для любого количества циклов нагружения. Очевидно, что при наличии упрочнения в материале значительный эффект на результирующую диаграмму будет оказывать количество циклов нагружения: многоцикловое упрочнение материала может приводить к стабилизации циклического поведения и «остановке» изменения диаграммы приспособляемости.

На рис. 8 представлены решения задачи для изотропного механизма упрочнения. Используется та же диаграмма деформирования материала, описание которой представлено в предыдущем разделе.

Как видно, для изотропного упрочнения характерен постепенный переход в зону приработки во всех точках диаграммы, что говорит о постепенном увеличении размера поверхности текучести, что для определенных амплитуд нагружения уже не дает прироста пластической деформации.

На рис. 9 представлены решения задачи для кинематического механизма упрочнения.

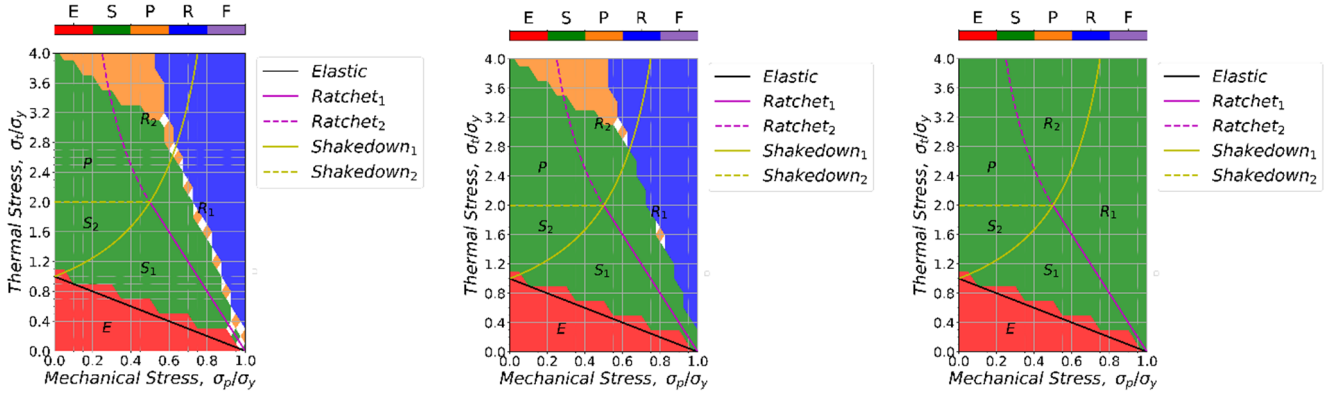
Видно, что в случае кинематического упрочнения в зону приработки переходит лишь часть диаграммы на уровне $\sigma_t / \sigma_y = 2$. При этом выше данного значения часть области рэтчетинга переходит в состояние знакопеременной пластичности. Данный результат хорошо коррелирует с исследованием [32].

На рис. 10 представлены решения задачи для смешанного механизма упрочнения.

Видно, что результаты для смешанного механизма упрочнения аналогичны кинематическому механизму. Данный эффект становится понятен, если обратиться к рис. 5. Для обоих механизмов процесс упрочнения схож:

- на первом цикле материал получил некоторую величину упрочнения;
- на втором цикле при кинематическом механизме упрочнения деформация идет по той же кривой деформирования, что для первого цикла, а при смешанном – по слегка измененной «упрочненной» кривой, однако различие между этими двумя кривыми незначительно для отражения данного эффекта на диаграмме приспособляемости.

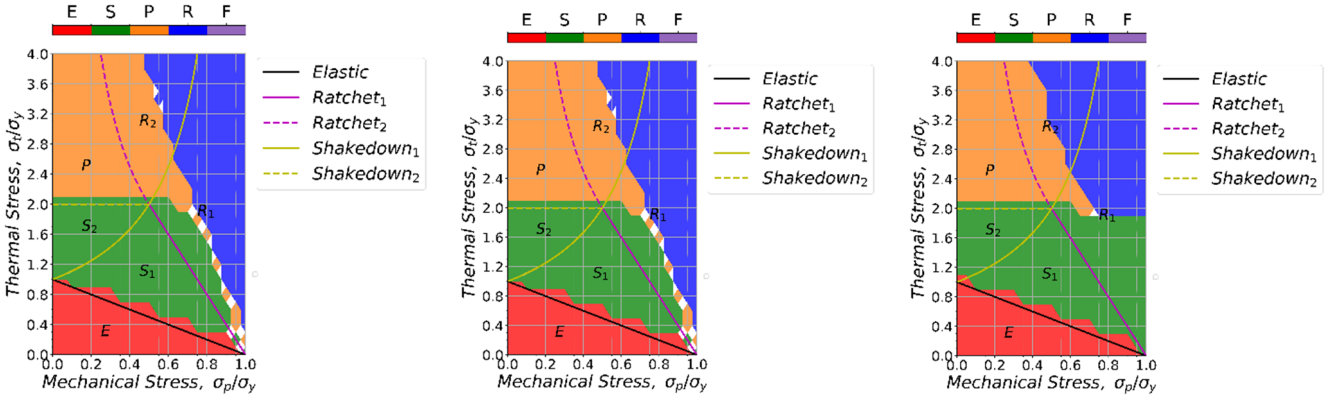
Помимо характера распределения зон приспособляемости значительное влияние на общее состояние материала оказывает абсолютная величина деформаций, возникающих в материале. На рис. 11 и 12 представлены диаграммы величин пластической деформации и приращения пластической деформации для двух механизмов упрочнения (при изначальной величине параметра $b = 5,76$).



a *b* *c*

Рис. 8. Диаграммы Бри для изотропного упрочнения: *a* – 1-й цикл; *b* – 3-й цикл; *c* – 15-й цикл

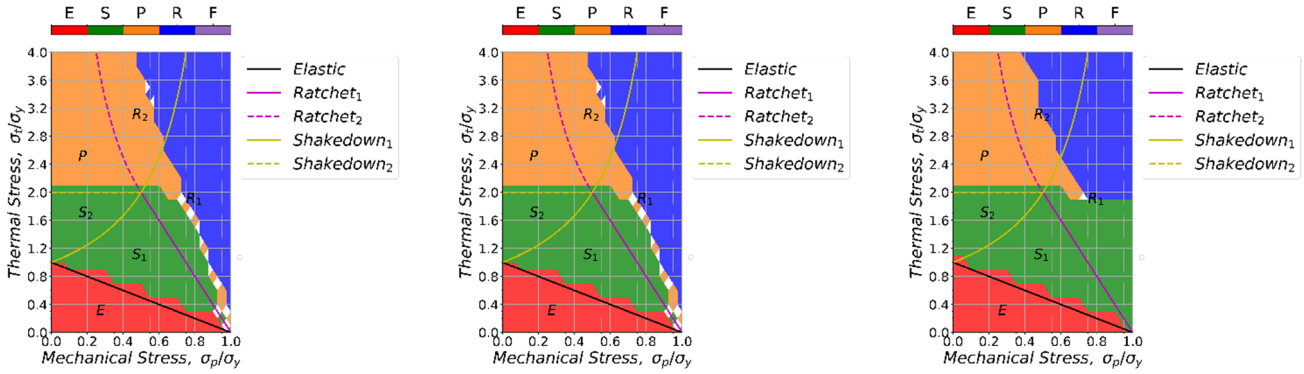
Fig. 8. Bree diagram with isotropic hardening: *a* – 1st cycle; *b* – 3rd cycle; *c* – 15th cycle



a *b* *c*

Рис. 9. Диаграммы Бри для кинематического упрочнения: *a* – 1-й цикл; *b* – 3-й цикл; *c* – 15-й цикл

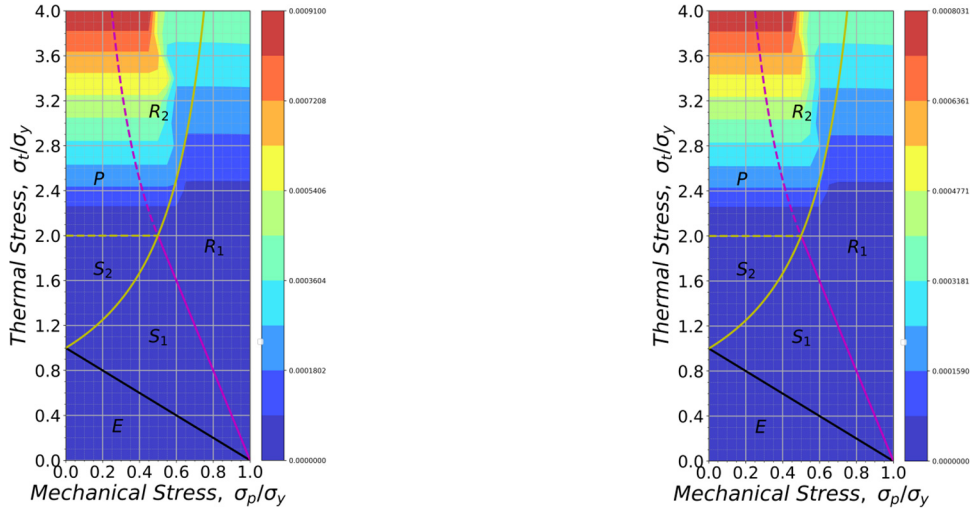
Fig. 9. Bree diagram with kinematic hardening: *a* – 1st cycle; *b* – 3rd cycle; *c* – 15th cycle



a *b* *c*

Рис. 10. Диаграммы Бри для смешанного упрочнения: *a* – 1-й цикл; *b* – 3-й цикл; *c* – 15-й цикл

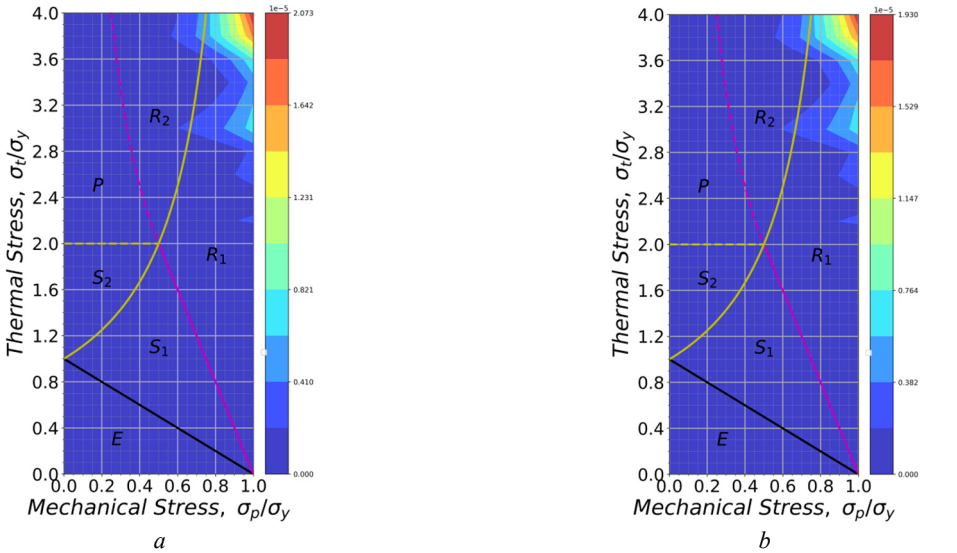
Fig. 10. Bree diagram with mixed hardening: *a* – 1st cycle; *b* – 3rd cycle; *c* – 15th cycle



a *b*

Рис. 11. Значение максимальной по толщине средней пластической деформации между циклами: *a* – кинематическое упрочнение; *b* – смешанное упрочнение

Fig. 11. Maximum mean plastic strains between cycles: *a* – kinematic hardening; *b* – mixed hardening



a *b*

Рис. 12. Значение приращения пластической деформации между циклами: *a* – кинематическое упрочнение; *b* – смешанное упрочнение

Fig. 12. Plastic strain increment between cycles: *a* – kinematic hardening; *b* – mixed hardening

По диаграммам видно, что значение средней деформаций и приращения между двумя последними циклами нагружения имеют различие в абсолютных значениях: кинематический механизм упрочнения дает значение деформаций на 12 % выше, чем смешанный механизм, за счет отсутствия составляющей изотропного упрочнения, повышающего прочностные характеристики материала.

Заключение

Согласно российским и зарубежным нормам проектирования атомных станций, оценка прочности оборудования и реакторных установок в условиях циклических нагрузок с учетом неупругого поведения материала должна включать в себя как отсутствие неограниченного роста пластических деформаций (отсутствие рэтчетинга), так и непревышение допустимых значений по общим накопленным деформациям. Данные требования предъявляются для полномасштабных расчетов с заданием циклических нагрузок на весь жизненный цикл и последовательным моделированием каждого цикла нагружения. Подобные расчеты применяются в случаях, когда упрощенные консервативные методики оценки циклической прочности не удовлетворяют критериям прочности.

В условиях данных требований и на базе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) изотропный механизм упрочнения не может использоваться для оценки циклической прочности с применением последовательного моделирования каждого цикла в силу завышения прочностных характеристик за счет увеличения радиуса поверхности текучести;

2) кинематический механизм упрочнения является наиболее консервативным, поскольку при малом количестве циклов нагружения дает устойчивую диаграмму приспособляемости, которая при дальнейшем нагружении не меняется. Значение приращения и средних деформаций между циклами больше, чем у смешанного механизма упрочнения, что позволяет консервативно оценить циклическую прочность конструкции по деформациям;

3) смешанный механизм упрочнения точнее описывает реальное поведение материала под действием циклических нагрузок, однако его использование зачастую осложнено необходимостью большой экспериментальной базы для определения параметров модели.

Библиографический список

1. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии / Е.О. Адамов [и др.] // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129, № 4. – С. 185–194.

2. Шаманин, И.В. Высокотемпературные ядерные энергетические технологии / И.В. Шаманин, П.М. Гаврилов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 5–9.

3. ГОСТ Р 59115.10-2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования. Национальный стандарт РФ. – М., 2021.

4. ASME BPVC.III.5-2015. Division 5 – High Temperature Reactors.

5. Bree, J. Elastic-plastic behaviour of thin tubes subject to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with application to fast nuclear reactor fuel elements / J. Bree // Journal of Strain Analysis. – 1967. – Vol. 2, № 3. – P. 226–238.

6. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 711 с.

7. Седов, Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1994. – Т. 1. – 528 с.; Т. 2. – 560 с.

8. Cyclic hardening/softening behavior of 316L stainless steel at elevated temperature including strain-rate and strain-range dependence: Experimental and damage-coupled constitutive modeling /Xue-fang Xie [et al.] // International Journal of Plasticity. – 2019. – № 114. – P. 196–214.

9. Modeling the Strain-Range Dependent Cyclic Hardening of SS304 and 08Ch18N10T Stainless Steel with a Memory Surface / R. Halama, J. Fumfera [et al.] // Metals. – 2019. – №9, 832. – 26 p.

10. Cyclic plasticity and low cycle fatigue of an aisi 316l stainless steel: experimental evaluation of material parameters for durability / M. Pelegatti, A. Lanzutti [et al.] // Materials. – 2021. – № 14, 3588. – 20 p.

11. Low-cycle fatigue properties of austenitic stainless steel s30408 under large plastic strain amplitude / Lei Chen [et al.] // Advanced Steel Construction. – 2022. – Vol. 18, № 1. – P. 517–527.

12. Determination of Combined Hardening Parameters to Simulate Deformation Behavior of C(T) Specimen under Cyclic Loading / Ho-Wan Ryu [et al.] // Procedia Structural Integrity. – 2018. – № 13. – P. 1932–1939.

13. Algarni, M. unified material model for multiaxial ductile fracture and extremely low cycle fatigue of Inconel 718 / M. Algarni, Y. Choi, Y. Bai // International Journal of Fatigue. 2017. – № 96. – P. 162–177.

14. Chaboche, J.L. Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening Of 316 Stainless Steel / J.L. Chaboche, K.D. Van, G. Cordier // In Proceedings of the International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany, 9–21 August. – 1979. – P. 12.

15. Lemaitre, J. Mechanics of Solid Materials / J. Lemaitre, J.L. Chaboche // Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1990. – 556 p.

16. Chaboche, J.L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity / J.L. Chaboche // Int. J. Plast. – 1986. – №2. – P. 149–188.

17. Chaboche, J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / J.L. Chaboche // Int. J. Plast. – 2008. – № 24. – P. 1642–1693.

18. Федоренков, Д.И. Методика определения констант и параметров модели накопления повреждений с изотропным и кинематическим упрочнением / Д.И. Федоренков, Д.А. Косов, А.В. Туманов // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 63–74.

19. Ansys 2021R2 Theory Guide – Ansys Inc, 2021.

20. Abaqus 2017 Theory Guide – Dassault Systems, 2017.

21. Ambroziak, A. Numerical modeling of elasto-viscoplastic Chaboche constitutive equations using MSC.MARC / A. Ambroziak // Task quarterly. – 2005. – Vol. 9, №2. – P 157–166.

22. Bradford, R.A.W. The Bree problem with primary load cycling in-phase with the secondary load / R.A.W. Bradford // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – №99. – P. 44–50.

23. Bradford, R.A.W. The Bree problem with primary load cycling out-of-phase with the secondary load / R.A.W. Bradford // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2017. – № 154. – P. 83–94.

24. Messner, M.C. N-bar problems as approximations to the Bree problem / M.C. Messner, T.-L. Sham, Y. Wang // ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. – 2018.

25. Чернявский, О.Ф. Предельные состояния и коэффициенты запаса при повторных нагружениях / О.Ф. Чернявский, А.О. Чернявский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – №3. – С. 125–135.

26. Чернявский, О.Ф. Описание деформационных свойств материалов при расчетах малоцикловой усталости / О.Ф. Чернявский, А.О. Чернявский // Вестник ЮрГУ, секция “Математика. Механика. Физика”. – 2021. – Т.13, №3. – С. 53–61.

27. Хохлов, А.В. Анализ общих свойств кривых ползучести при циклических ступенчатых нагружениях, порождаемых линейной теорией наследственности / А.В. Хохлов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2017. – Т. 21. № 2. – С. 326–361.

28. Туркова, В.А. Инкрементальный анализ двухосного нагружения пластины с круговым отверстием: приспособляемость, знакопеременная пластичность и рэтчетинг / В.А. Туркова // Вестник СамГУ. – 2015. – №3 (125). – С. 106–124.

29. Туркова, В.А. Различные режимы циклического нагружения неупругой пластины: конечно-элементный анализ двухосного нагружения упругопластической пластины с эллиптическим вырезом / В.А. Туркова, Л.В. Степанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – №3. – С. 207–221.

30. Бондарь, В.С. Пластичность материалов при пропорциональных и непропорциональных циклических нагружениях / В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев, В.К. Петров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №3. – С. 53–74.

31. Бондарь, В.С. Сравнительный анализ вариантов теорий пластичности при циклических нагружениях / В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев, В.К. Петров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №2. – С. 23–44.

32. Pei, X. The effects of kinematic hardening on thermal ratcheting and Bree diagram boundaries / X. Pei, P. Dong, J. Mei // Thin-Walled Structures. – 2021. – №159. – 159 p.

33. Pei, X. A universal approach to ratcheting problems of Bree type incorporating arbitrary loading and material nonlinearity conditions / X. Pei, P. Dong // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – №185. – 13 p.

34. Морозов, Н.Ф. Численный метод анализа приспособляемости упруго-пластических тел при переменных нагрузках / Н.Ф. Морозов, Р.В. Федоренко, А.В. Лукин // Композиты и наноструктуры. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 69–84.

References

1. E.O. Adamov et al. Bystryj reaktor so svincovym teplonositelem BREST: ot koncepcii k realizacii tekhnologii [BREST fast reactor with lead coolant: from concept to technology implementation] // Atomnaya energiya. – 2020. – Vol. 129, №4. – p. 185-194.

2. Shamanin I.V., Gavrilov P.M. Vysokotemperaturnye jadernye jenergeticheskie tehnologii [High-temperature nuclear energy technologies]// Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2010. – Vol.316, №4. - p. 5-9.

3. GOST R 59115.10-2021. Obosnovanie prochnosti oborudovanija i truboprovodov atomnyh jenergeticheskih ustanovok. Utochnennyj poverochnyj raschet na stadii proektirovanija. Nacional'nyj standart RF [Substantiation of the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. An updated verification calculation at the design stage. The national standard of the Russian Federation], 2021.

4. ASME BPVC.III.5-2015. Division 5 – High Temperature Reactors

5. Bree J. Elastic-plastic behaviour of thin tubes subject to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with application to fast nuclear reactor fuel elements // Journal of Strain Analysis. – 1967. – Vol. 2, № 3. – pp. 226-238.

6. Rabotnov Ju. N. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela [Solid mechanics]. – M.: Nauka, 1988. – 711 p.

7. Sedov L. I. Mehanika sploshnoj sredy [Mechanics of Continuous Media]. – M.: Nauka, 1994. – T. 1. – 528 s., T. 2. – 560 p.

8. Xue-fang Xie et al. Cyclic hardening/softening behavior of 316L stainless steel at elevated temperature including strain-rate and strain-range dependence: Experimental and damage-coupled constitutive modeling // International Journal of Plasticity. – 2019. – № 114. – pp. 196-214.

9. Halama R., Fumfera J. et al. Modeling the Strain-Range Dependent Cyclic Hardening of SS304 and 08Ch18N10T Stainless Steel with a Memory Surface // Metals. – 2019. – №9, 832. – 26 p.

10. Pelegatti M., Lanzutti A. et al. Cyclic plasticity and low cycle fatigue of an aisi 316l stainless steel: experimental evaluation of material parameters for durability // Materials. – 2021. – №14, 3588. – 20p.

11. Lei Chen et al. Low-cycle fatigue properties of austenitic stainless steel s30408 under large plastic strain amplitude // Advanced Steel Construction. – 2022. – Vol. 18, №1. – pp. 517-527.

12. Ho-Wan Ryu et al. Determination of Combined Hardening Parameters to Simulate Deformation Behavior of C(T) Specimen under Cyclic Loading // Procedia Structural Integrity. – 2018. – №13. – pp. 1932-1939.

13. Algarni M., Choi Y., Bai Y. A unified material model for multiaxial ductile fracture and extremely low cycle fatigue of Inconel 718 // International Journal of Fatigue. 2017. – №96. – pp. 162-177.

14. Chaboche J.L., Van K.D., Cordier G. Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening Of 316 Stainless Steel // In Proceedings of the International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany, 9–21 August 1979; p. 12.

15. Lemaitre J., Chaboche J.L. Mechanics of Solid Materials // Cambridge University Press: Cambridge, UK. - 1990. – 556 p.

16. Chaboche J.L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity // Int. J. Plast. – 1986. – №2. – pp. 149–188.

17. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // Int. J. Plast. – 2008. – №24. – pp. 1642–1693.

18. Fedorenkov D.I., Kosov D.A., Tumanov A.V. A method for determining the constants and parameters of a damage

accumulation model with isotropic and kinematic hardening // Physical Mesomechanics. – 2022. – Vol.26, №6. – pp. 63-74.

19. Ansys 2021R2 Theory Guide – Ansys Inc, 2021.

20. Abaqus 2017 Theory Guide – Dassault Systems, 2017

21. Ambroziak A. Numerical modeling of elasto-viscoplastic Chaboche constitutive equations using MSC.MARC // Task quarterly. – 2005. – Vol. 9, №2. – pp 157-166.

22. Bradford R.A.W. The Bree problem with primary load cycling in-phase with the secondary load // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – №99. – C. 44-50.

23. Bradford R.A.W. The Bree problem with primary load cycling out-of-phase with the secondary load // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2017. – №154. – C. 83-94.

24. Messner M.C., Sham T.-L., Wang Y., N-bar problems as approximations to the Bree problem // ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.

25. Chernyavsky O.F., Chernyavsky A.O. Predel'nye sostoyaniya i koefficienty zapasa pri povtornyh nagruzheniyah [Limit states and safety factors under repeated loading] // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. – №3. – pp 125–135.

26. Chernyavsky O.F., Chernyavsky A.O. Opisanie deformacionnyh svojstv materialov pri raschetah malociklovoj ustalosti [Description of the deformation properties of materials in low-cycle fatigue calculations] // Bulletin of the South Ural State University, series “Mathematical. Mechanics. Physics”. – 2021. – Vol.13, №3. – pp 53-61.

27. Khokhlov A.V. Analiz obshchih svojstv krivyh polzuchesti pri ciklicheskih stupenchatyh nagruzheniyah, porozhdaemyh linejnoj teoriej nasledstvennosti [Analysis of creep curves produced by the linear viscoelasticity theory under cyclic stepwise loadings] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki. – 2017. – Vol.21. №2. – pp 326-361.

28. Turkova V.A. Inkremental'nyj analiz dvuhosnogo nagruzheniya plastiny s krugovym otverstiem: prisposoblyaemost', znakoperemennaya plastichnost' i retcheting [Incremental analysis of twoaxial loading of the plate with central circular hole: shakedown (accomodation), alternating plasticity, ratcheting] // Vestnik SamGU. – 2015. – №3 (125). – pp 106-124.

29. Turkova V.A., Stepanova L.V. Razlichnye rezhimy ciklicheskogo nagruzheniya neuprugoj plastiny: konechno-elementnyj analiz dvuhosnogo nagruzheniya uprugoplasticheskoj plastiny s ellipticheskim vyrezom [Finite element analysis of biaxial cyclic tensile loading of elasto-plastic plate with central elliptical hole] // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – №3. – pp 207–221.

30. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Plastichnost' materialov pri proporcional'nyh i neproporcional'nyh ciklicheskih nagruzheniyah [Plasticity of materials with proportional and non-proportional cyclic loading] // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. – №3. – pp 53–74.

31. Bondar V.S., Abashev D.R., Petrov V.K. Sravnitel'nyj analiz variantov teorij plastichnosti pri ciklicheskih nagruzheniyah [Comparative analysis of variants of plasticity theories under cyclic loading] // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. – №2. – pp 23–44.

32. Pei X., Dong P., Mei J. The effects of kinematic hardening on thermal ratcheting and Bree diagram boundaries // Thin-Walled Structures. – 2021. – №159. – 159 p.

33. Pei X., Dong P. A universal approach to ratcheting problems of Bree type incorporating arbitrary loading and material nonlinearity conditions // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – №185. – 13 p.

34. Morozov N.F., Fedorenko R.V., Lukin A.V. Chislennyj metod analiza prisposoblyaemosti uprugo-plasticheskih tel pri peremennyh nagruzkah [Computational method for ratcheting analysis of the elastoplastic bodies under cyclic loads] // Composites and Nanostructures. – 2024. – Vol.16, №1. – pp. 69-84.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение № 075-15-2020-311 от 20.04.2022).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the World-Class Research Center program: Advanced Digital Technologies (agreement No. 075-15-2020-311 dated 04.20.2022).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.