

76
/

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

Апайчев Михаил Викторович

УДК 539.374:620.172

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ
И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

01.02.04 - Механика твердого деформируемого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Челябинск-1986

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель – доктор технических наук,
и.о. профессора Садаков О.С.

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН УССР,
доктор технических наук,
профессор Лебедев А.А.

кандидат технических наук,
доцент Икрин В.А.

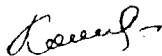
Ведущая организация – Институт проблем механики АН СССР.

Защита состоится " II " _июня_ 1986 года на заседании
специализированного совета Д.053.13.01 Челябинского
политехнического института им. Ленинского комсомола
по адресу: 454044, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 8 " _мая_ 1986 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, кандидат технических наук,
доцент



Кононов К.М.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — совершенствование расчетной оценки параметров неупругого деформирования конструкций при циклических воздействиях путем экспериментально-теоретического изучения деформационных свойств конструкционных материалов в условиях циклического непропорционального нагружения и способов их математического описания, а также разработки на этой основе метода прямого расчета стационарного циклического состояния конструкции.

При этом решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование деформационных свойств материалов при циклическом непропорциональном нагружении.
2. Сопоставление экспериментальных данных с расчетами по ряду известных вариантов теории пластичности.
3. Более углубленное изучение одного из частных, типичных для ряда конструкций случаев циклического непропорционального нагружения, получение для этих условий уравнений связи между напряжениями и деформациями в стабилизированном циклическом состоянии.
4. Решение краевой задачи прямого расчета стационарного циклического состояния конструкции при периодических воздействиях.

На защиту выносятся:

1. Новые экспериментальные результаты о влиянии предистории и типа траектории циклического нагружения на деформационные свойства материалов, в частности, на степень изотропного (циклического) упрочнения; экспериментальные данные об особенностях "памяти" материала о предистории циклического непропорционального нагружения.
2. Установленные из испытаний закономерности деформирования при циклическом непропорциональном нагружении, когда переменные составляющие напряжений изменяются пропорционально общему параметру.
3. Методика прямого расчета параметров неупругого деформирования конструкции в стационарном циклическом состоянии.

АКТУАЛЬНОСТЬ. В решениях XXVII съезда КПСС по дальнейшему росту эффективности и экономичности промышленного производства особое внимание уделяется повышению технико-экономических показателей оборудования. Рост единичных мощностей промышленного оборудования при одновременном снижении габаритов и материалоемкости сопровождается увеличением его нагруженности и связан с необходимостью использования всех ресурсов несущей способности конструкций, в частности, за счет их ограниченной неупругой деформации. При этом возникает опасность малоциклового разрушения, что предъявляет повышенные требования к

достоверности расчетов полей напряжений и деформаций в процессе работы конструкции и оценки на их основе прочности и долговечности.

При циклическом нагружении, которое характерно для многих элементов конструкций машиностроения, турбостроения, энергетического, металлургического и химического оборудования, реакция конструкции на внешнее воздействие достаточно быстро стабилизируется: наступает стационарное циклическое состояние, характеризующееся периодическим изменением полей напряжений и скоростей деформаций и охватывающее, как правило, большую часть срока службы. Поэтому для оценки долговечности часто можно ограничиться рассмотрением стационарного циклического состояния, не учитывая перераспределение напряжений на первых циклах. Для расчета напряжений и деформаций в таком состоянии необходимы относительно малотрудоемкие методы, использующие соотношения теории пластичности, которые адекватно описывают поведение реальных материалов в стабилизированном циклическом состоянии.

При повторном нагружении конструкций, напряженное состояние которых отличается от одноосного, весьма типичным является существенное отклонение деформирования в каждой точке от пропорционального. Поэтому необходимо, чтобы применяемые в расчетах теории неупругого деформирования достоверно описывали реологические свойства при циклическом непропорциональном (сложном) нагружении. Между тем, из-за ограниченности опытных данных в расчетах, проводимых при проектировании конструкций, часто используются теории, адекватность которых при циклическом непропорциональном нагружении не анализировалась.

Работа проводилась в соответствии с Координационным планом АН СССР НИР по проблеме "Механика твердого тела" код. I.10.2.5: "Прочность и пластичность при переменных нагружениях. Разработка и экспериментальное обоснование математических моделей упруговязкопластической среды для описания процессов циклического неизотермического нагружения...".

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Получены экспериментальные данные, позволяющие расширить имеющиеся представления о специфических особенностях циклического непропорционального нагружения, связанных с наличием у материалов эффекта "памяти" о предистории деформирования и влиянием типа траектории нагружения на деформационные свойства.

Проведен количественный анализ различных вариантов теории пластичности, позволивший оценить степень их достоверности в условиях циклического непропорционального **напряжения** и очертить границы их возможного применения.

Для наиболее часто встречающегося в конструкциях типа циклического непропорционального нагружения (при котором переменные составляющие напряжения изменяются пропорционально) предложены уравнения связи между напряжениями и деформациями в стабилизированном циклическом состоянии. Эти уравнения обобщены на неизотермическое нагружение с учетом ползучести.

Разработана методика прямого расчета размахов и накопленной односторонней деформации в стационарном циклическом состоянии конструкции при повторных внешних воздействиях.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Полученные в работе данные о поведении материалов при циклическом непропорциональном нагружении могут быть использованы при разработке и оценке адекватности новых вариантов теорий неупругого деформирования и основанных на них методов расчета конструкций.

Для частного, наиболее типичного случая циклического непропорционального нагружения предложены соотношения между напряжениями и деформациями, которые могут применяться для анализа деформирования конкретных конструкций.

Разработана и апробирована инженерная методика ускоренного расчета параметров неупругого деформирования конструкции, которая может использоваться для оценки долговечности оборудования.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты работы докладывались на УШ Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Пермь, 1983), II Всесоюзном симпозиуме "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (Киев, 1984) (2 доклада), а также на I областной конференции молодых ученых и специалистов предприятий и организаций машиностроительной промышленности (Челябинск, 1981), научно-технических конференциях ЧПИ (1981-1985).

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 работы.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из четырех глав, выводов, списка литературы (128 наименований) и приложений. Она изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При эксплуатации оборудования, наиболее нагруженные элементы которого испытывают повторное неупругое деформирования, существует опасность малоциклового разрушения вследствие непрекращающегося знакопеременного пластического течения, либо прогрессирующего изменения

геометрических размеров и квазистатического разрушения вследствие одностороннего накопления деформаций. Отсюда следует необходимость расчетов эволюции полей напряжений и деформаций в процессе работы конструкции и оценки на их основе прочности и долговечности. Для рационального выбора соответствующего метода расчета необходима математическая модель материала, адекватно отражающая реальные деформационные свойства.

Экспериментальные исследования поведения конструкционных сплавов при непропорциональном нагружении, проведенные Б. Д. Ананиным, Р. А. Васькиным, В. П. Дегтяревым, А. А. Лебедевым, Н. С. Можаровским, В. В. Москвитиным, Ю. Н. Шевченко, О. А. Шимаревым, Т. Иноуэ, Ё. Охашу, О. Сайдботтомом и др., выявляют сложную картину реологических свойств, связанных с эффектами скалярного и векторного запаздывания, трансформацией поверхности текучести и т. д. Значительная часть исследований до настоящего времени была сосредоточена на однократном непропорциональном нагружении (траектории в виде двух- и многозвенных ломаных, малой и средней кривизны). Данные испытаний по циклическому непропорциональному нагружению довольно ограничены и в основном сводятся к результатам исследования деформационных свойств в течение нескольких первых циклов, когда процессы деформирования имеют нестабильный характер, либо к изучению влияния формы и размеров траектории циклического нагружения на долговечность. Закономерности деформирования материалов при большом числе циклов нагружения, включая стабилизированное циклическое состояние, при циклическом непропорциональном нагружении изучены недостаточно. Между тем они могут существенно влиять на деформирование конструкций при повторных воздействиях.

Трудности, связанные с необходимостью математического описания всего многообразия деформационных свойств, породили большое количество теорий неупругого деформирования. В феноменологических теориях, к которым относятся теории деформационного типа и теории течения (исследования Р. А. Арутюняна, И. А. Биргера, А. А. Вакуленко, А. А. Ильющина, А. Ю. Ишлинского, Ю. И. Кадашевича, В. С. Ленского, Н. Н. Малинина, В. В. Москвитина, В. В. Новожилова, Г. М. Хажинского, Б. Ф. Шорра, М. Айзенберга, З. Мруза, В. Прагера и др.), свойства материалов моделируют на основе определенных гипотез относительно связи между параметрами состояния, не используя представления о микромеханизме неупругого деформирования. В физических теориях, в отличие от первых, при описании закономерностей деформирования рассматривается реальная структура поликристаллического материала (работы Д. А. Гаврилова, В. С. Зарубина, М. Я. Ле-

онова, А.А.Полякова и др.). Промежуточное место занимают структурные модели среды, в которых микронеоднородность материала отражается формализованно и элементарный объем представляется в виде совокупности гипотетических подэлементов, наделенных достаточно простыми свойствами (исследования Д.А.Гохфельда, В.С.Зарубина, И.А.Иванова, Ю.И.Кадашевича, В.В.Новожилова, В.Ю.Маринь, О.С.Садакова, Ю.Н.Шевченко, Дж.Бесселинга, Г.Мазинга, Х.Янсейла и др.).

Анализ опубликованных исследований показывает, что основные трудности при моделировании реологических свойств в условиях непропорционального нагружения связаны с описанием резких изменений закона деформирования при поворотах траектории и влиянием поворотных моментов на последующие деформационные свойства. Как правило, теории неупругого деформирования разрабатываются на базе известных закономерностей поведения материалов при пропорциональном нагружении. Чтобы оценить степень достоверности этих теорий при циклическом непропорциональном нагружении, необходимо сопоставление соответствующих расчетных и экспериментальных результатов. Между тем анализ возможностей различных теорий при описании закономерностей деформирования в этих условиях практически отсутствует. Этим обосновываются сформулированные выше цель и задачи исследования.

1. Закономерности циклического непропорционального нагружения

Эксперименты, результаты которых приведены в работе, выполнены на автоматизированной установке, предназначенной для испытаний трубчатых образцов на одновременное циклическое кручение и растяжение-сжатие. Достоверность полученных результатов подтверждает акт метрологической проработки измерительной аппаратуры, прилагаемый к диссертации. Поскольку реализуется плоское напряженное состояние, векторы напряжения \bar{S} , деформации \bar{e} и неупругой деформации \bar{p} располагаются в плоскости девiatorного пространства А.А.Ильюшина, задаваемой осями \bar{q}_1 и \bar{q}_3 . Координаты векторов определяются выражениями

$$S_1 = \sigma / \sqrt{3}, \quad e_1 = \sqrt{3} [\epsilon - (gK)^{-1} \sigma] / 2, \quad p_1 = \tau - (2g)^{-1} S_1, \quad (1)$$

$$S_3 = \tau, \quad e_3 = \tau / 2, \quad p_3 = e_3 - (2g)^{-1} S_3,$$

где σ , τ - нормальное и касательное напряжения; ϵ , τ - линейная и угловая деформации; K , G - модули упругости. Длина (интенсивность) соответствующего вектора ($S_{ii} = \sqrt{S_1^2 + S_3^2} = \sqrt{S_1^2 + S_3^2}$) в дальнейшем обозначается индексом "и"; скалярное произведение - точкой между векторами.

Эксперименты проводили на сталях 20, 30ХГСА и 40Х. Эти материалы при циклическом пропорциональном нагружении являются циклически стабилизирующимися: в жестких испытаниях после незначительного упрочнения (увеличения амплитуды напряжения) в течение 5...10 циклов, не превышающего 15%, диаграммы деформирования становятся замкнутыми. Отличие между диаграммами в испытаниях с разными значениями S_1/S_3 не более 5...8%. Перед началом испытаний на непропорциональное нагружение проводили стабилизацию каждого образца на циклическое кручение и растяжение-сжатие.

Результаты экспериментов сопоставлялись с расчетами по трем вариантам теории течения (Н.Н.Малицина-Г.М.Хажинского - в дальнейшем обозначается цифрой 1, Б.Ф.Шорра - 2, двухповерхностная модель З.Мруза - 3), по модификации деформационной теории В.В.Москвитина и по варианту структурной модели среды, разрабатываемому на кафедре сопротивления материалов Челябинского политехнического института. Эти теории вполне достоверно описывают свойства при циклическом пропорциональном нагружении. Во всех расчетах было принято, что материал циклически стабильный.

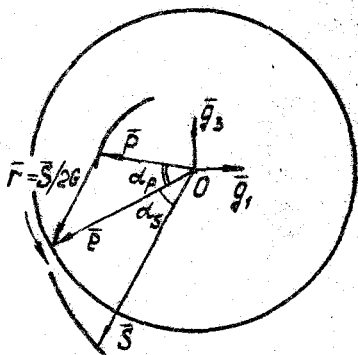


Рис. 1. Циклическое непропорциональное нагружение с постоянной интенсивностью деформации

Эксперименты показывают, что у всех исследованных сталей, предварительно доведенных до стабилизированного состояния пропорциональным деформированием, при нагружении с постоянной интенсивностью деформации (рис.1) изотропное упрочнение возобновляется. Оно выражается в увеличении интенсивности напряжения S_n : в течение нескольких начальных циклов траектория напряжений имеет форму раскручивающейся спирали. Одновременно происходит увеличение интенсивности неупругой деформации ρ_n , связанное с развитием векторного запаздывания: векторы \bar{S} , \bar{p} и $\bar{\rho}$ становятся все

более разориентированными. В наступающем затем стабилизированном состоянии длины векторов напряжения и неупругой деформации и углы между векторами перестают меняться. Сравнение значений интенсивности напряжения с кривыми пропорционального нагружения показывает, что дополнительное изотропное упрочнение для стали 30ХГСА может достигать 20%,

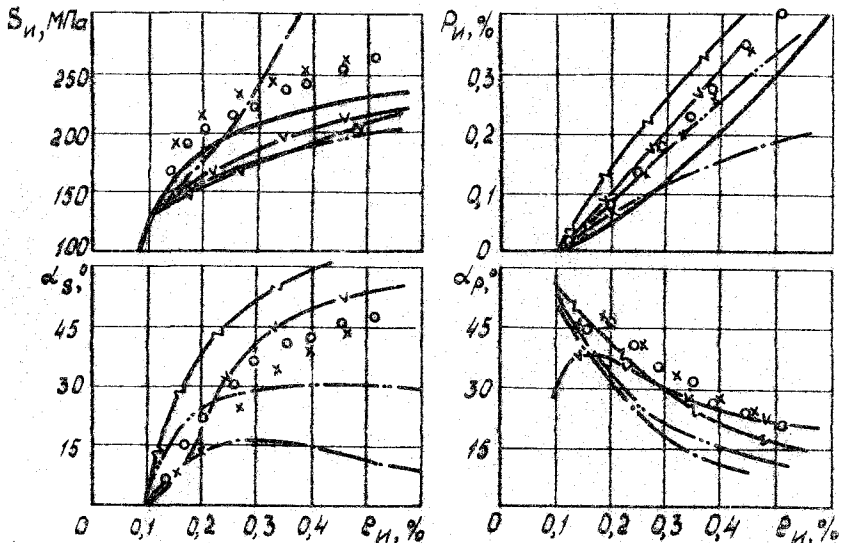


Рис. 2. Циклическое нагружение стали 30ХГСА со ступенчато изменяющейся интенсивностью деформации. Кривая пропорционального нагружения — ; расчетные кривые по моделям: — — — 1, — — — 2, — — — 3, — v — по структурной модели средн

для стали 40X — 25%, для стали 20 — 13%. Расчеты по всем рассмотренным теориям, за исключением 2, дают разупрочнение материала: отличия значений S_{II} от данных испытаний составляет 25...30%. Упрочнение, получаемое в 2, оказывается неоправданно большим: расхождение с экспериментом может достигать 200...250%.

Относительное увеличение значений интенсивности неупругой деформации по сравнению с пропорциональным нагружением, которое для исследуемых сталей составляет 20...30%, достаточно достоверно описывается всеми теориями, кроме 2, в которой величины ρ_{II} сильно занижены.

В экспериментах со ступенчато изменяющейся интенсивностью деформации на реологические свойства сталей в стабилизированном состоянии, в частности, на степень изотропного упрочнения влияет последовательность, в которой задается деформирование по окружностям различного радиуса. В испытаниях с уменьшающейся интенсивностью деформации (крестики на рис. 2) значения S_{II} получаются больше, чем в испытаниях, где деформирование происходит в сторону увеличения радиуса (кружки). Ни одна из теорий течения, как и используемый вариант

структурной модели, не описывает расхождение результатов в этих испытаниях, поскольку оно полностью связано с изотропным упрочнением.

Изотропное упрочнение, которое произошло при циклическом деформировании вдоль окружности, не является необратимым. При последующем пропорциональном нагружении наблюдается возврат к исходному циклически стабильному состоянию. Он проявляется в разупрочнении в течение первых циклов (рис. 3, N - номер цикла), после чего диаграмма деформирования совпадает со стабильной кривой пропорционального нагружения. При этом возврат является полным только для направления, в котором осуществлялось пропорциональное нагружение. Если затем провести нагружение в ортогональном направлении (например, кручение после растяжения-сжатия), то вновь будет происходить разупрочнение. Однако оно будет меньшим, чем если бы деформирование в этом направлении осуществлялось сразу после непропорционального нагружения (рис. 3).

При циклическом нагружении вдоль треугольных траекторий деформаций (рис. 4) поведение исследовавшихся материалов также довольно быстро стабилизируется. Траектория напряжений становится замкнутой кривой, каждая ветвь которой между точками поворота состоит из прямолинейного участка упругой разгрузки и криволинейного, соответствующего возобновлению неупругого деформирования. Теории течения качественно верно отражают процесс стабилизации. Однако по виду расчетные кривые, полученные на основе вариантов 1 и 2, существенно отличаются от экспериментальных: на них отдельные участки имеют неверную кривизну. По

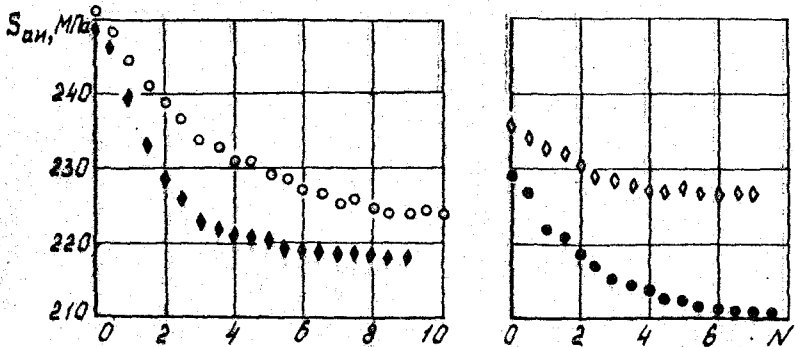


Рис. 3. Изменение амплитуды напряжений при жестком пропорциональном нагружении, проводимом после непропорционального нагружения со ступенчато уменьшающейся интенсивностью деформации. SOXSA: \circ - растяжение, \diamond - кручение; 4OX: \blacklozenge - круч., \bullet - раст.

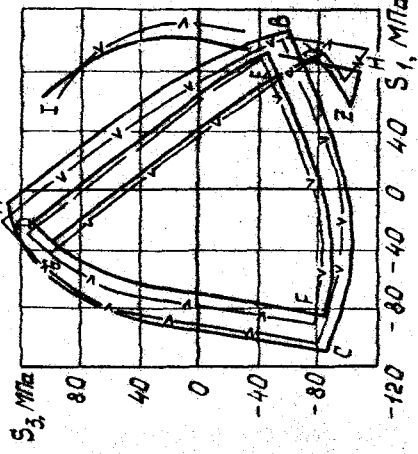
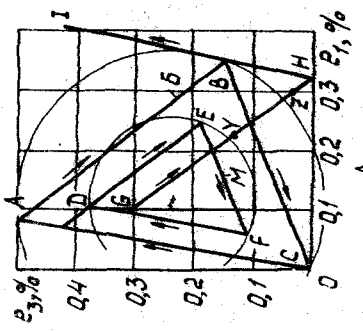


Рис. 5. Траектории деформаций и стабильные траектории напряжений стали 20: эксперимент —, расчет по структурной модели —v—

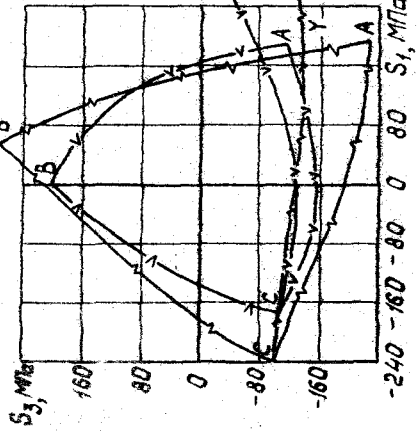
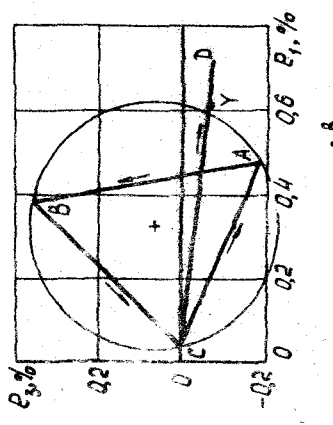
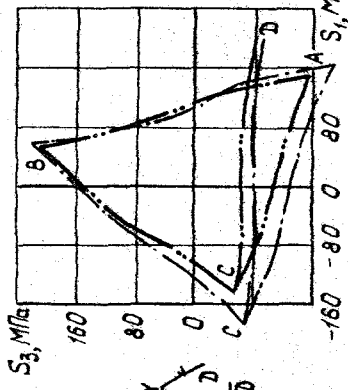
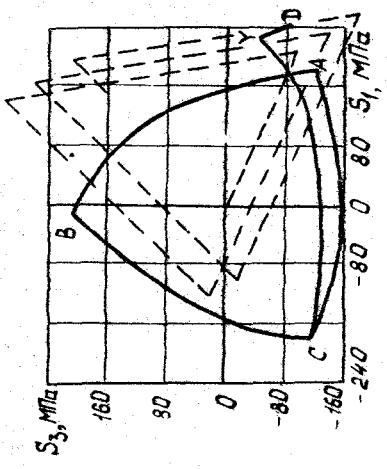


Рис. 4. Дилатическое деформирование стали 40X по треугольной траектории. Стабильные траектории напряжений: — эксперимент; расчетные по вариантам: --- I, --- 2, --- 3, ---v— структурной модели. Расчетная траектория по теории Москвитина ---

модели 3 размеры расчетных траекторий получаются заметно завышенными. Расчет по модифицированной деформационной теории Москвитина дает непрерывающееся смещение траектории напряжений, что противоречит опытным данным. Наилучшее соответствие результатам испытаний дают расчеты по структурной модели, которые достаточно точно описывают все отмеченные эффекты.

У всех исследованных сталей проявляется существенное влияние на процессы деформирования истории циклического непропорционального нагружения. Если после стабилизации траектории напряжений при деформировании по треугольной траектории (3...5 циклов) осуществляется нагружение вдоль отрезка CD , пересекающего треугольник (рис. 4), то в определенный момент (точка Y) происходит резкое изменение закона деформирования. Оно проявляется в виде излома на траектории напряжений. При более сложной предыстории непропорционального нагружения (рис. 5, последовательная стабилизация траектории напряжений при деформировании вдоль треугольника B , затем M) последующее монотонное изменение деформации BN сопровождается появлением двух резких изломов (точки Y и Z) на траектории напряжений. Эта своеобразная "память" материала о предыстории, видимо, связана с тем, что циклическое непропорциональное нагружение приводит к возникновению определенной системы микронапряжений. При последующем нагружении они не изменяются до тех пор, пока деформация не превысит некоторого уровня. Когда это происходит, микронапряжения перераспределяются, что и приводит к практически дискретному изменению закона деформирования. Ни один из рассмотренных вариантов теории течения дискретную "память" не отражает, лишь структурная модель удовлетворительно описывает этот эффект (рис. 4, 5).

Изучение деформационных свойств сталей 20 и 30ХГСА проводили также при самом простом типе циклического непропорционального нагружения (в дальнейшем условно называемом сложным циклически пропорциональным или сип-нагружением), при котором траектория задавалась в виде отрезка либо в пространстве деформаций

$$\bar{\epsilon}(t) = \bar{\epsilon}_m + \omega_p(t) \bar{\epsilon}_a, \quad (2)$$

либо в пространстве напряжений (рис. 6)

$$\bar{\sigma}(t) = \bar{\sigma}_m + \omega_s(t) \bar{\sigma}_a \quad (3)$$

($\omega_p(t)$, $\omega_s(t)$) принадлежат классу функций $\{\omega, t_n, t_1, t_2\}$ циклически изменяющихся во времени с периодом t_n в интервале $[-1; 1]$ и достигающих экстремальных значений в моменты $t_1^n = t_1 + n t_n$ и $t_2^n = t_2 + n t_n$, $n = 0, 1, \dots$.

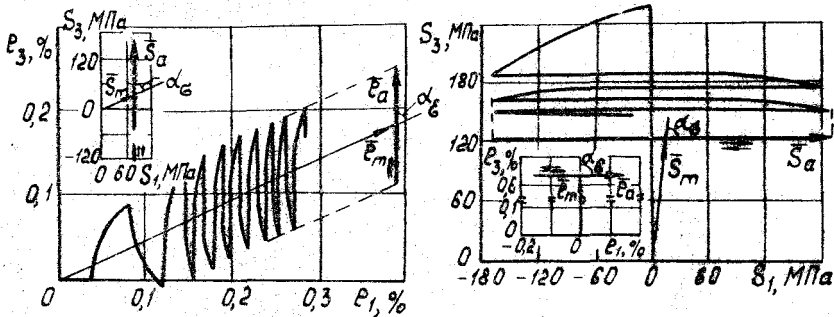


Рис. 6. Сложное циклически пропорциональное нагружение: а) силовое (сталь 20); б) кинематическое (сталь 30ХГСА)

Как показывают расчеты, такой вид нагружения часто встречается в конструкциях при циклических воздействиях (например, диски газовых турбин, трубки теплообменников и т. д.).

При силовом нагружении на начальных циклах происходит накопление деформации (рис. 6а); кинематическое нагружение сопровождается циклической релаксацией напряжения (рис. 6б). Оба эти процесса заканчиваются после нескольких десятков первых циклов. Наступающему затем стабилизированному состоянию материала соответствуют вполне определенные векторы статических составляющих \bar{S}_m, \bar{E}_m и амплитуды циклических составляющих \bar{S}_a, \bar{E}_a напряжения и деформации. Основное внимание в диссертации уделяется изучению связи между этими векторами.

Испытания показали, что в стабилизированном состоянии деформационные свойства слабо зависят от того, является ли нагружение кинематическим или силовым. Циклические составляющие напряжения и деформации не зависят от статических. Векторы \bar{S}_a и \bar{E}_a коллинеарны, а связь между их длинами хорошо описывается кривой пропорционального нагружения. На связь между статическими составляющими \bar{S}_m и \bar{E}_m влияют интенсивность амплитуды циклической составляющей $\bar{E}_{aн}$ при кинематическом (или $S_{aн}$ при силовом) нагружении, а также взаимная ориентация векторов циклических и статических составляющих. Значения углов α_g и α_g (рис. 6) в обоих типах сдв-нагружения мало отличаются (не более, чем на $4...8^\circ$) и приближенно могут быть приняты равными $\alpha_g \approx \alpha_g = \alpha$. Неколлинеарность векторов \bar{S}_m и \bar{E}_m во всех испытаниях не превышает $8...10^\circ$. Связь между длинами этих векторов (рис. 7) подчиняется некоторой функциональной зависимости, включающей в качестве параметров

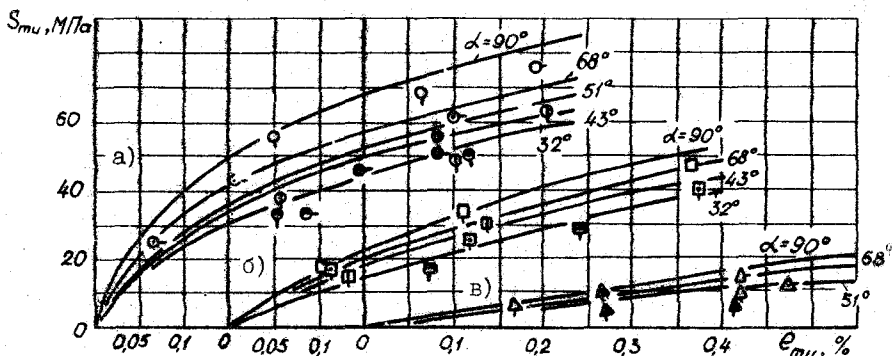


Рис. 7. Связь между статическими составляющими напряжения и деформации при сдв-нагрузении стали 20: а) $e_{\sigma_{ти}} = 0,065\%$ ($\alpha = 90^\circ \circ, 68^\circ \bullet, 51^\circ \circ, 43^\circ \circ, 32^\circ \circ$); б) $e_{\sigma_{ти}} = 0,14\%$ ($\alpha = 90^\circ \square, 68^\circ \square, 43^\circ \square, 32^\circ \square$); в) $e_{\sigma_{ти}} = 0,6\%$ ($\alpha = 90^\circ \triangle, 68^\circ \triangle, 51^\circ \triangle$). Вертикальные черточки возле значка - кинематическое нагружение, горизонтальные - силовое; — расчет по уравнению (6)

длину вектора циклической составляющей $e_{\sigma_{ти}}$ и угол α : $S_{\sigma_{ти}} = \Omega(e_{\sigma_{ти}}, e_{\sigma_{ти}}, \alpha)$.

Расчеты по модели 3 дают непрерывающееся увеличение статической составляющей деформации в случае силового сдв-нагружения при ненулевых значениях $S_{\sigma_{ти}}$ и полную релаксацию статической составляющей напряжения при жестком сдв-нагружении. Расчеты по 1 и 2 дают заниженные в 1,5...1,7 раза значения статической составляющей деформации по сравнению с экспериментальными данными при силовом нагружении. Кроме того, в 1 связь между циклическими составляющими зависит от статических.

Наиболее достоверно деформационные свойства при сдв-нагружении отражает структурная модель упругопластической среды. Непосредственное использование уравнений модели (уравнений инкрементального типа) связано с необходимостью пошагового расчета вплоть до стабилизации. Однако в случае сдв-нагружения из анализа этих уравнений при использовании некоторых допущений могут быть получены уравнения конечного вида, связывающие напряжения и деформации в стабилизированном состоянии.

2. Описание сложного циклически пропорционального нагружения

Согласно структурной модели элемент объема работает как совокупность подэлементов с различными реологическими свойствами. Деформа-

ция подэлемента \bar{E}_k ($k=1, \dots, N$ - номер подэлемента), равная деформации элемента объема \bar{E} , складывается из неупругой \bar{F}^k и упругой \bar{F}^k составляющих. Последняя связана с напряжением \bar{S}^k законом Гука: $\bar{F}^k = (2G)^{-1} \bar{S}^k$. Осреднением векторов по подэлементам получаются соответствующие векторы элемента: $\bar{S} = \langle \bar{S}^k \rangle = \sum_{k=1}^N \bar{S}^k g_k$, $\bar{E} = \langle \bar{E}^k \rangle$ и т.д., где g_k - относительные веса подэлементов ($\sum_{k=1}^N g_k = 1$). Неупругая деформация подэлемента задается законом течения, ассоциированным с поверхностью текучести Мизеса, с пределом текучести S_T^k . Параметры подэлементов g_k и S_T^k определяются по диаграмме пропорционального нагружения с использованием ее кусочно-линейной аппроксимации.

В диссертации показано, что при сдв-нагружении структурной модели, траектория которого описывается уравнением (2), в стабилизированном состоянии вектор упругой деформации также изменяется по периодическому закону $\bar{F}(t) = \bar{F}_m + \omega_r(t) \bar{F}_a$. Все подэлементы разделяются на деформирующиеся пластически ($r_T^k < e_{an}$, $\bar{F}^k(t) = \omega_k(t) r_T^k \bar{E}_a / e_{an}$; $\omega_r, \omega_k \in \{\omega, t_1, t_2\}$, где $r_T^k = (2G)^{-1} S_T^k$) и работающие упруго ($r_T^k \geq e_{an}$, $\bar{F}^k(t) = \bar{F}_m^k + \omega_e(t) \bar{E}_a$). Получаемое после осреднения по подэлементам уравнение для циклических составляющих напряжения и деформации

$$\bar{S}_a = 2G \bar{F}_a = F(e_{an}) \frac{\bar{E}_a}{e_{an}} \quad (4)$$

полностью соответствует экспериментальным данным ($F(x)$ - функция, описывающая диаграмму пропорционального нагружения). На основе допущения о том, что в процессе нагружения интенсивность деформации не превышала значения $e_m^e = \sqrt{(\bar{E}_m + \bar{E}_a) \cdot (\bar{E}_m + \bar{E}_a)}$ (что не противоречит действительной картине стабилизации при сдв-нагружении), и вытекающего из эксперимента предположения о коллинеарности векторов \bar{S}_m и \bar{E}_m получается уравнение связи между этими векторами

$$\bar{S}_m = \Omega(e_{mi}, e_{an}, \alpha) \bar{E}_m / e_{mi}, \quad (5)$$

$$\Omega(e_{mi}, e_{an}, \alpha) = 2G \langle S^k H(r_T^k - e_{an}) H(e_m^e - r_T^k) + e_{mi} H(r_T^k - e_m^e) \rangle, \quad (6)$$

$$S^k = \sqrt{(r_T^k)^2 - e_{an}^2 \sin^2 \alpha} - e_{an} \cos \alpha, \quad \cos \alpha = (e_{an} e_{mi})^{-1} \bar{E}_a \cdot \bar{E}_m,$$

где $H(x)$ - функция Хевисайда. Уравнения деформационного типа (4), (5) описывают связь между амплитудами и статическими составляющими напряжения и деформации непосредственно в стабилизированном состоянии. Функция Ω для конкретного материала достаточно просто строится на основе диаграммы пропорционального нагружения. Удовлетворительная адекватность предлагаемых уравнений подтверждается экспериментальными данными (рис. 7).

0194215

Практически важно распространить полученные результаты на неизо-термическое нагружение и учесть возможность ползучести. При пропорциональном нагружении из анализа структурной модели следует гипотеза о центральном подобии кривых деформирования при различных температурах ($r_T^k(T) = \theta(T)r_T^k(T_0)$, T_0 - базовая температура) и скоростях нагружения. Ее использование для описания непропорционального нагружения позволяет обобщить физические уравнения стабилизированного состояния (4)-(6) на неизо-термическое нагружение и одновременно учесть ползучесть

$$\Delta \bar{\tau} = (\theta_1 + \theta_2) f \left(\frac{\Delta \epsilon_{ii}}{\theta_1 + \theta_2} \right) \frac{\Delta \bar{P}}{\Delta \epsilon_{ii}}, \quad f(x) = (2G)^{-1} F(x), \quad (7)$$

$$F_m = \frac{\tau_{mii}}{\rho_{mii}} \bar{P}_m, \quad \tau_{mii} = \langle m_{ii} \rho(\delta_1^k; \delta_2^k) H[(v_1 + v_2) r_T^k - \Delta \epsilon_{ii}] H(z - r_T^k) + \dots \rangle \quad (8)$$

$$z = \max \left(\frac{\rho_{11}(z)}{v_1}, \frac{\rho_{22}(z)}{v_2} \right), \quad \theta_i^k = \frac{v_i \Delta \epsilon_{ii}}{v_1 + v_2} \left[(-1)^i \cos \alpha + \sqrt{(r_T^k \frac{v_1 + v_2}{\Delta \epsilon_{ii}})^2 - \sin^2 \alpha} \right], \quad (i=1,2).$$

Здесь $\Delta \bar{P}$, $\Delta \bar{\tau}$ - размахи полной и упругой деформации; $v(T) = x(T)\theta(T)$; $x(T) = G_n/G_B$; G_n, G_B - предел ползучести и временное сопротивление; $\cos \alpha = (\rho_{mii} \Delta \epsilon_{ii})^{-1} \Delta \bar{P}_m$. Индексами 1 и 2 обозначаются значения соответствующих величин в моменты реверса t_1^n и t_2^n .

На базе предложенных физических уравнений в диссертации разработана методика прямого расчета параметров неупругого деформирования конструкции в стационарном циклическом состоянии. В конструкциях, в которых реверсы изохронны, а переменные составляющие внешних воздействий изменяются приблизительно пропорционально общему параметру, в каждой точке нагружение близко к сдвиг-нагружению. На стадии стабилизации, предшествующей стационарному циклическому состоянию, в каждой точке происходит нагружение, занимающее промежуточное место между силовым и кинематическим. Так как для этих типов нагружения закономерности деформирования в стабилизированном состоянии мало отличаются, вполне допустимо для расчета конструкции использовать полученные выше физические уравнения. Это позволяет выделить замкнутую систему уравнений для определения циклических составляющих напряжений и деформаций, включающую уравнения равновесия, условия совместности и физическое уравнение. Аналогичная система получается и для статических составляющих, но в соответствующее физическое уравнение входит результат решения первой задачи. Расчет циклических составляющих по трудоемкости эквивалентен решению задачи нелинейной теории упругости. Получаемые значения размахов деформации $\Delta \epsilon_{ii}$ затем используются при решении системы уравнений для статических составляющих напряжений и деформаций. Трудоемкость последней соизмерима с решением задачи нелинейной теории упругости для физически неоднородного тела.

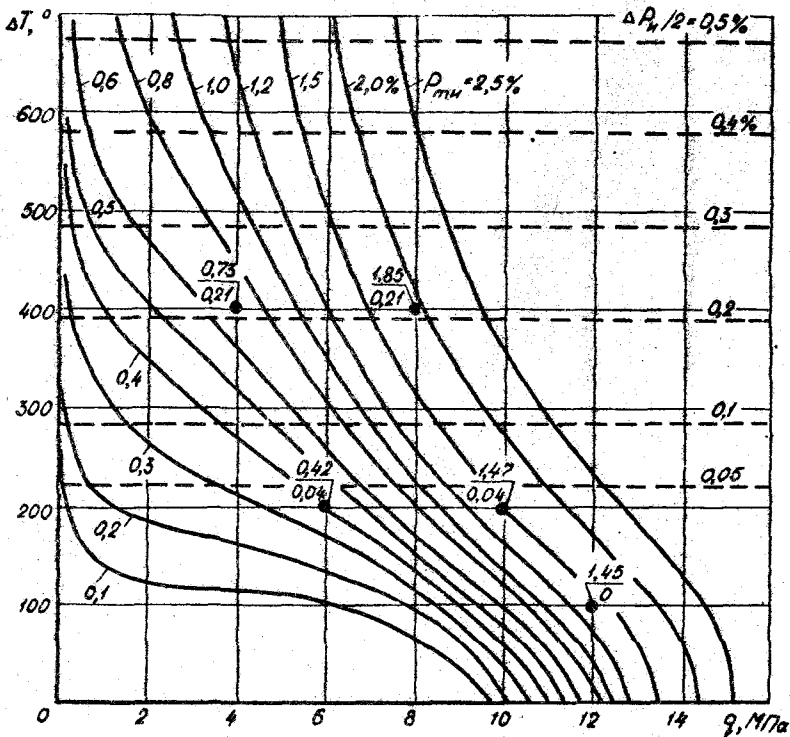


Рис. 8. Зависимость размахов и накопленных неупругих деформаций в стационарном циклическом состоянии в точках внутренней поверхности трубки теплообменника при постоянном внутреннем давлении и теплосменах. Расчет кинетики: $\frac{\rho_{\text{пл}}, \%}{\Delta P_n/2, \%}$

Разработанная методика применена для прямого расчета стационарного циклического состояния трубки теплообменника, нагруженной внутренним давлением и периодически изменяющимся температурным полем, переменным по радиусу. Сопоставление с результатами поциклового расчета кинетики неупругого деформирования (рис. 8) подтверждает достоверность предлагаемой методики. Значения размахов неупругой деформации ΔP_n , полученные по двум расчетам, практически совпадают, относительное расхождение накопленных деформаций $\rho_{\text{пл}}$ не превышает 10...12%; затраты машинного времени при прямом расчете кинетики стационарного циклического состояния в 10...40 раз меньше, чем при расчете кинетики.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы реологические свойства конструкционных сталей 20, 30ХГСА и 40Х. Установлено, что при циклическом нагружении поведение материала достаточно быстро стабилизируется, т.е. наступает стабилизированное циклическое состояние: траектории напряжений и деформаций повторяются от цикла к циклу.

2. Экспериментально обнаружено, что степень изотропного (циклического) упрочнения зависит от типа нагружения. При циклическом нагружении с постоянной интенсивностью деформации степень упрочнения выше, чем при пропорциональном циклическом нагружении. При переходе от одной программы циклического деформирования к другой каждый раз происходит либо изотропное упрочнение, либо разупрочнение в зависимости от типа нагружения.

При циклическом нагружении с постоянной интенсивностью деформации одновременно с изотропным упрочнением происходит увеличение (по сравнению с пропорциональным нагружением) интенсивности неупругой деформации, связанное с эффектом запаздывания векторных свойств. Видимо, оно является причиной наблюдавшегося в испытаниях ряда авторов существенного снижения долговечности в сравнении с пропорциональным деформированием при том же значении интенсивности размаха деформации.

3. При нагружении со ступенчато изменяющейся интенсивностью деформации на степень изотропного упрочнения влияет последовательность, в которой происходит деформирование по окружностям различного радиуса (возрастание или убывание интенсивности деформации). В испытаниях с уменьшающейся интенсивностью упрочнение оказывается выше, чем в опытах со ступенчато возрастающим радиусом траектории деформаций.

4. Обнаружено, что эффект "памяти" о предыстории циклического непропорционального нагружения проявляется в виде резких изменений закона деформирования (изломов траектории напряжений) при монотонном изменении деформации после предварительного непропорционального деформирования.

5. Исследованы деформационные свойства для наиболее часто встречающегося в практике сложного циклически пропорционального нагружения, при котором переменные составляющие напряжения или деформации задаются пропорциональными одному общему параметру. Выявлено, что связь между размахами напряжений и деформации в стабили-

зированной циклическом состоянии не зависит от статических составляющих и от истории нагружения. Изучено влияние размаха деформации и неколлинеарности векторов циклических и статических составляющих на связь между статическими составляющими напряжения и деформации в стабилизированном циклическом состоянии.

6. Проведен анализ возможности количественного описания полученных результатов с позиций ряда известных вариантов теории пластичности. Показано, что ни один из рассмотренных вариантов теории течения, как и модификация деформационной теории, не позволяет достаточно достоверно отразить деформационные свойства в условиях повторно-переменного непропорционального нагружения. Выявлено, что наилучшей адекватностью обладает структурная модель упругопластической среды.

7. На основании экспериментально установленных закономерностей деформирования при сложном циклически пропорциональном нагружении и анализа уравнений структурной модели среды получены уравнения связи (деформационного типа) между напряжениями и деформациями в стабилизированном циклическом состоянии. Уравнения обобщены на случай неизотермического нагружения с учетом ползучести.

8. На основе полученных уравнений разработана методика решения краевой задачи прямого расчета стационарного циклического состояния конструкции при регулярных повторно-переменных нагружениях.

9. С помощью предложенной методики исследовано влияние параметров внешнего воздействия на величины размахов и односторонне накопленных деформаций в трубке теплообменника, нагруженной внутренним давлением и периодически изменяющимся температурным полем. Достоверность разработанной методики подтверждается путем сопоставления полученных результатов с поцикловым расчетом кинетики неупругого деформирования.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

I. Использование структурной модели среды для описания связи между напряжениями и деформациями в стабильном циклическом состоянии. - В кн.: Прочность машин и аппаратов при переменных нагружениях. Челябинск: Сб. трудов ЧПИ, 1983, с.60-65.

2. Использование структурной модели упруговязкопластической среды для расчета асимптотического поведения конструкций, испытывающих повторные силовые и тепловые воздействия. - В кн.: УШ Всес. конф. по прочности и пластичности. Тезисы докладов. Пермь, 1983, с.10-11 (в соавторстве с А.И.Березиным, В.Э.Гохбергом, М.Е.Мартыненко).

3. Управление непропорциональным циклическим деформированием трубчатых образцов с помощью АВМ. - В кн.: П Всес. симпоз. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии". Тезисы докладов. Ч. I. Киев, 1984, с.7-8 (в соавторстве с А.Ю.Волчегатьевым, К.К.Дубовиковым, С.И.Вересовым).

4. Установка для изучения деформационных и прочностных характеристик конструкционных материалов при непропорциональном циклическом нагружении в условиях нормальной и повышенных температур. - Проблемы прочности, 1985, №2, с.118-121 (в соавторстве с Д.А.Гохфельдом, И.А.Ивановым, К.К.Дубовиковым).

