

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО НДС ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАГРЕВЕ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

к.ф.-м.н. **Ширвель П.И.**

Белорусский национальный технический университет, Минск

В различных отраслях современной техники широко используются конструктивные элементы, выполненные в виде тел цилиндрической формы. В процессе эксплуатации они могут подвергаться воздействию как силовых, так и немеханических нагрузок (термических, радиационных). Длительное нахождение тел в физических и механических полях приводит к возникновению деформаций тепловой и радиационной ползучести. Научные результаты исследования нелинейных процессов деформирования развивающихся во времени и пространстве, имеют важное значение при создании новых технологических процессов и аппаратов для использования на транспорте, в энергетике, авиации и атомной промышленности. Таким образом, разработка и развитие теории и методов расчета НДС цилиндрических тел, находящихся в условиях неоднородного термического и радиационного нагружений, в настоящее время актуальная проблема механики твердого тела, решение которой позволит корректно определять НДС, а также продлять ресурс компонентов оборудования и других конструкций в условиях сложных немеханических воздействий.

В предыдущих работах [1–4] был сформулирован вариант механико-математической модели определения неосесимметричного НДС, учитывающей изменение напряжений и деформаций по периметру цилиндрических тел с учетом влияния тепловых и радиационных эффектов в условиях плоской и обобщенной плоской деформации. Очевидно, что для окончательных заключений требуется детальное исследование моделей в широком поле изменения температур, окружной неравномерности, радиационных нагрузок. Задача настоящей работы заключается в проведении численных экспериментов и проверке разработанной модели на соответствие заявленным свойствам, в первую очередь, неосесимметричному деформированию в условиях ползучести и облучения. Также будут приведены результаты сравнения с осесимметричной моделью [5,6].

Таким образом, используя методику, приведенную в [1–4] выполним виртуальное моделирование $2D(r, \theta)$ деформирования односвязного цилиндрического тела в условиях терморadiационных воздействий и подробно рассмотрим влияние окружной неравномерности на неосесимметричное НДС для различных значений амплитуд температур. В качестве модельных тел, будем рассматривать сплошные цилиндры, выполненные из конструкционного материала.

Замечание: неосесимметричное деформирование тепловыделяющего цилиндра было рассмотрено ранее в работах [7,8], вариант расчета полого цилиндра из конструкционного материала представлен в [9].

В качестве конкретного примера рассмотрим неосесимметричное НДС неравномерно нагретого по периметру длинного сплошного цилиндра без внутренних источников тепловыделения, облучаемого потоком быстрых нейтронов ($\bar{E} > 0.1$ МэВ) плотностью $\theta = 2.81 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см²·ч. Стационарный температурный нагрев осуществляется по закону:

$$\Delta T(r, \theta) = T(r, \theta) - T_s = A \left(\frac{r}{R} \right)^4 \sin(4\theta), \quad (1)$$

где $A=50$, $R=0.003\text{ м}$, $T_s=823\text{ К}$. Упругие и теплофизические характеристики физико-механических свойств конструкционного материала соответствуют нержавеющей аустенитной стали (например, AISI 316): $E=2.1 \cdot 10^5\text{ МПа}$; $\mu=0,3$; $\alpha=12,6 \cdot 10^{-6}\text{ 1/К}$.

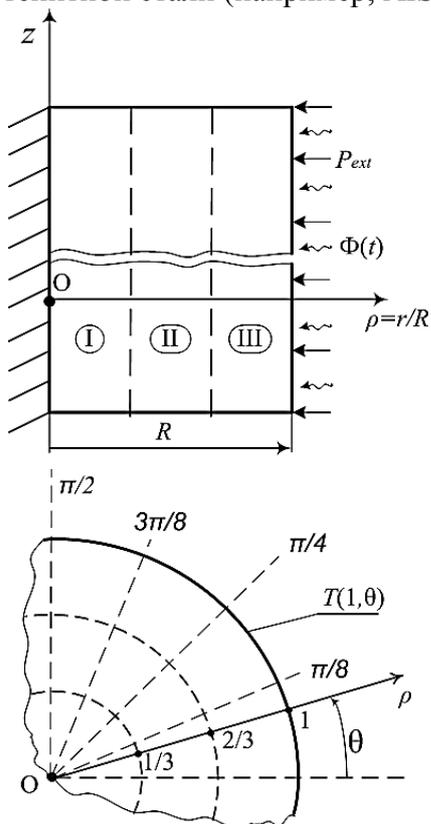


Рисунок 1. – Схема анализа неосесимметричного НДС

Механическое давление, равномерно распределенное по внешней поверхности цилиндра равно $P_{ext}=8\text{ МПа}$. Закон изменения радиационных деформаций задаем на основании экспериментальных данных по набуханию и формоизменению конструкционных материалов в терморadiационных потоках [9–13]. Для учета радиационного набухания используем наиболее общую зависимость, связывающую набухание аустенитных сталей с температурой облучения и флюенсом быстрых нейтронов [9]

$$S = \frac{\Delta V}{V} = A_{0S} A_S(T) \Phi^{\lambda_S(T)}, \quad (2)$$

здесь T – температура, К; $A_{0S}=4.9 \cdot 10^{-51}$; $\lambda_S(T)=1,71$ ($T < 950\text{ К}$); $A_S(T) = 10^{\frac{1,55 \cdot 10^4}{T} - \frac{5,981 \cdot 10^6}{T^2}}$; $\Phi = \theta t$ – флюенс нейтронов ($\Phi \leq 7 \cdot 10^{22}\text{ нейтрон/см}^2$); $\bar{E} > 0.1\text{ МэВ}$.

Замечание: различные варианты эмпирических коэффициентов закона набухания (2) для конкретных марок сталей можно найти в известных работах [9–13], а также в последних зарубежных публикациях, например [14, 15].

Закон терморadiационной ползучести задаем согласно [13] в соответствии с испытаниями на ползучесть облученной и необлученной стальной трубы под давлением инертного газа:

$$\dot{\epsilon}_u^c = (dce^{-ct} + B)\sigma_u^m + K_0 \exp(1.405 - 0.0027 \cdot T) f \phi \sigma_u, \quad (3)$$

где первая часть выражения задает термическую ползучесть, а вторая – радиационную. Константы ползучести следующие: $m=5,1$; $d=1.5 \cdot 10^{-13}\text{ МПа}^{-5,1}$; $c=0.0016\text{ ч}^{-1}$; $B=6.9 \cdot 10^{-17}\text{ МПа}^{-5,1} \cdot \text{ч}^{-1}$; $f=1.75$; $K_0=2.68 \cdot 10^{-28}(\text{МПа} \cdot \text{нейтр/см}^2)^{-1}$; $\theta=2.81 \cdot 10^{19}\text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ – поток быстрых нейтронов с энергией $\bar{E} > 0.1\text{ МэВ}$, T – температура, К; t – время, ч.

Замечание: другие зависимости для терморadiационной ползучести можно найти в [9–16].

На основании общей методики, изложенной в [1–4, 6] проведено 2 серии расчетов: при минимальных нагрузках и различных значениях амплитуды окружной неоднородности и при нагрузках, позволяющих исследовать влияние на НДС температурного и радиационного фактора. Также рассмотрено влияние неравномерного температурного распределения на работоспособность модельного тела при изменениях температуры от 500°С до 600°С и величине флюенса нейтронов вплоть до $10^{27}\text{ нейтрон/м}^2$. В результате выполненных численных экспериментов получена общая картина характеристик неосесимметричного НДС в длинном сплошном цилиндре в условиях ползучести и облучения. Изменение по периметру тела полей напряжений показано на рисунках 2-4, изменение деформаций приведено на эпюрах 5-7. Анализ неосесимметричного НДС проведем по схеме рисунка 1.

Для начала рассмотрим изменение напряженного состояния цилиндра, как по периметру, так и во времени. Распределение полей напряжений в указанном диапазоне терморadiационных нагрузений в зависимости от окружной координаты показано на рисунке 2, в зависимости от радиуса на рисунке 4. Из эпюр рисунков 2-4 видно, что неоднородность напряженного состояния сглаживается по мере приближения к продольной оси, причем изменение интенсивности напряжений на внутреннем участке ($0 \leq \rho \leq 1/3$) близко к равномерному. В целом уровень напряжений в точках сечения для $1/3 \leq \rho \leq 2/3$ и $\theta = [\pi/4; \pi/2]$ значительно выше, чем во всех остальных по периметру модельного тела. Это можно объяснить влиянием окружной температурной неравномерности согласно (1) и, как следствие, относительно небольшой, по сравнению с горячими сечениями термической ползучестью материала со временем на центральном и внешнем участке. Отметим, что даже при больших значениях флюенсов нейтронов возникающие в конструкции терморadiационные напряжения, не превышают предел пропорциональности.

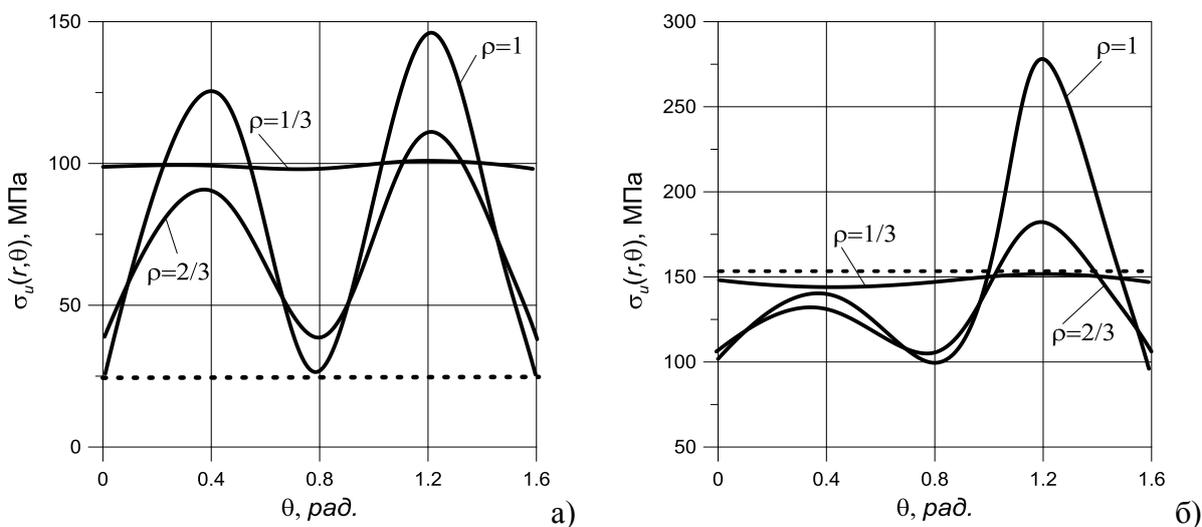


Рисунок 2. – Изменение интенсивности напряжений по периметру сечения при $t=1000$ ч (а) и $t=5000$ ч (б) с учетом (—) и без учета (---) окружной неравномерности температуры ($A=50$)

В тоже время, заметим, что учет окружной неравномерности, проявляющейся в первую очередь в увеличении доли объемных деформаций, со временем значительно увеличивает максимальные напряжения в холодных сечениях и снижает в горячих. Это хорошо видно на эпюрах рисунка 2: напряжения с учетом окружной неравномерности ($A=50$) показаны сплошными линиями, без учета – штрихами.

Теперь сравним полученные результаты по осесимметричной и неосесимметричной моделям. Из графиков рисунков 2 видно, что изменение интенсивности напряжений на внутреннем участке равномерно в кольцевом направлении, причем при больших интервалах времени нагружения ($t > 4500$ ч) величина интенсивности напряжений первого участка ($0 \leq \rho \leq 1/3$) совпадает с результатами для осесимметричного деформирования (без учета окружной неравномерности температуры). В тоже время, на среднем ($1/3 \leq \rho \leq 2/3$) и внешнем ($2/3 \leq \rho \leq 1$) интервалах расчет напряжений по осесимметричной модели несколько завышает напряжения в горячих сечениях и значительно занижает в холодных. На начальных этапах нагружения осесимметричная модель дает неудовлетворительные результаты (рисунок 2, а). Можно предположить, что при больших интервалах времени деформирования ($t > 5000$ ч) напряженное состояние по осесимметричной модели достаточно точно определяется на внутреннем участке. На центральном и внешнем интервалах результаты разнятся: завышаются для сечений $\theta = [0; \pi/4]$ и занижаются для $\theta = [\pi/4; \pi/2]$. Так, сравнивая результаты приближенной и точной задач для $\theta = [\pi/4; \pi/2]$ получаем, что

максимальные напряжения, определяемые по неосесимметричной модели в холодных сечениях в 1.8 раза больше напряжений, определенных по осесимметричной модели, что может привести, в свою очередь, к ошибочным рекомендациям при проектировании элементов конструкций. Очевидно, что это объясняется принятыми допущениями в осесимметричном случае. Погрешность такого расчета в сравнении с неосесимметричной моделью в первую очередь зависит от величины амплитуды окружной неравномерности и уровня температур, что определяет распухание материала и термическую ползучесть, а также некоторых других факторов: флюенса нейтронов, величины давления, физико-механические свойства материала. Следует отметить, что при $A < 15$ распределение напряжений на I участке также становится осесимметричным, причем на II и III участках неоднородность напряженного поля при указанной амплитуде окружной развертки температур не превышает 9%.

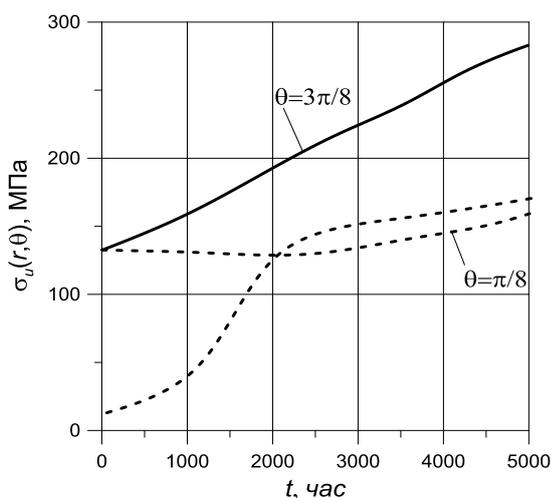


Рисунок 3. – Изменение интенсивности напряжений во времени для внешнего участка ($\rho=1$) в случае неосесимметричного температурного поля (I) с учетом (—) и без учета (---) окружной неравномерности температуры ($A=50$)

На рисунке 2(б) график изменение интенсивности напряжений по периметру внутреннего участка модельного тела при $A=15$ совпадает с распределением напряжений по периметру без учета окружной неравномерности деформирования (осесимметричное деформирование). Последнее свидетельствует о том, что при $A < 15$ окружную неравномерность для упрощения задач можно не учитывать так, как значения возникающих напряжений совпадают с осесимметричным напряженным состоянием (максимальное расхождение составляет 9% для $A=15$ при $\rho=1$).

Ниже, на эпюрах рисунка 4, представлены терморadiационные напряжения для различных сечений в зависимости от радиальной координаты. Условия задачи те же: термосиловое нагружение с учетом действия максимального флюенса нейтронов.

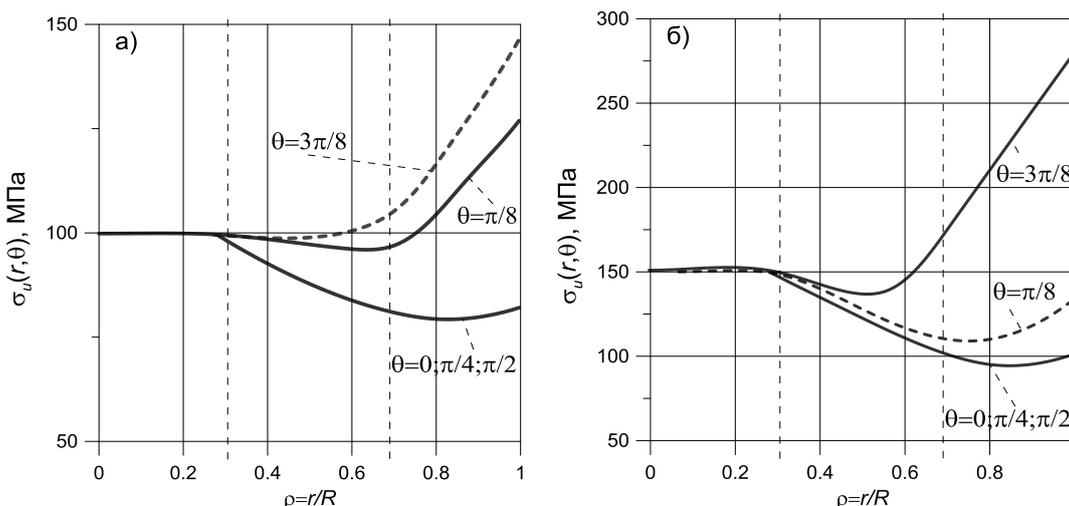


Рисунок 4. – Распределение напряжений вдоль радиуса при различных окружных координатах при $t=1000$ ч (а) и $t=5000$ ч (б)

Анализ влияния на напряженное состояние стального цилиндра переменности нагружения в окружном и радиальном направлениях показал, что значительная

неоднородность интенсивности напряжений на начальных этапах нагружения ($t=0\dots 1000$ ч) обусловлена в первую очередь неосесимметричностью температурного поля $T(r,\theta)$. Причем при $t=0\dots 500$ часов наибольшие значения получает осевая компонента тензора напряжений, а напряжения в плоскости сечения меняются незначительно в окрестности нуля. В дальнейшем при $t=500\dots 1000$ часов эта неравномерность проявляется наиболее сильно на среднем и внешнем участках сечений для $\theta=[0;\pi/4]$. С течением времени (1000...5000ч) резкая неоднородность полей напряжений для II и III участков горячих сечений сглаживается. Это связано в первую очередь с большой термической ползучестью материала в горячих точках сечений. В то же время на III участке при $\theta=[\pi/4;\pi/2]$ неравномерность распределения напряжений остается достаточно высокой, но вместе с тем, с течением времени, меняется характер такого распределения по периметру, что уже объясняется, в первую очередь, действием неоднородного радиационного распухания на материал. Распределение объемного радиационного распухания по периметру модельного тела показано на рисунке 5.

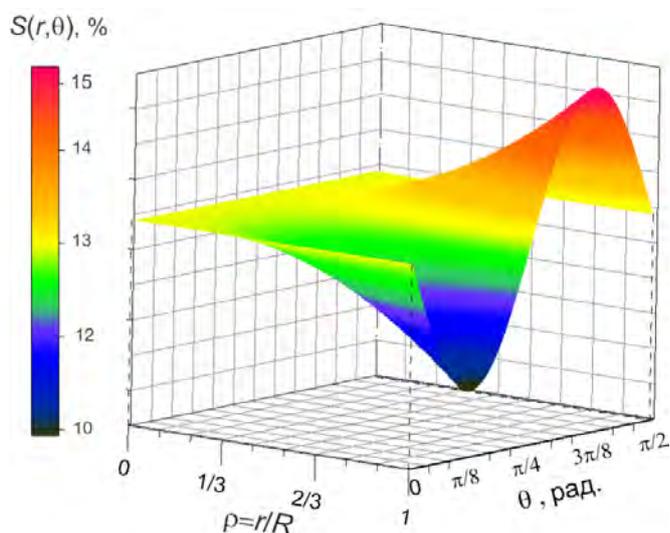


Рисунок 5 – Поверхность распределения радиационного распухания стального цилиндра за 5000ч облучения потоком быстрых нейтронов ($E > 0.1$ МэВ) плотностью $\theta = 2.81 \cdot 10^{19}$ нейтрон/(см²·ч) с учетом неосесимметричного нагрева ($A=50$)

Как видно из рисунка 5, распределение радиационного распухания в горячих и холодных сечениях, резко неравномерно, что обусловлено значительным влиянием окружной неосесимметричности температурного поля на третьем участке. В то же время абсолютные значения распухания на внешнем участке ($1/3 \leq \rho \leq 2/3$) изменяются незначительно ($\Delta S_{max} = 5\%$). Его величина достигает своего максимального значения на внешней поверхности при $\theta = 3\pi/8$, а минимум при заданных условиях терморadiационного нагружения внешней границе при $\theta = \pi/8$. В сечениях $\theta = 0, \pi/4, \theta = \pi/2$ наблюдается равномерное распухание, причем величина необратимой объемной деформации одинакова ($S \approx 13\%$).

Такое же значение принимают радиационные деформации при $\rho < 1/3$ во всех окружных сечениях. Это обусловлено особенностями образования и соединения микропор в металле при облучении согласно моделям [16–18]. Указанный аспект подробно изложен в работах по физике твердого тела и радиационному материаловедению.

Нужно отметить, что в данном случае картина распределения радиационного распухания качественно повторяет распределение неосесимметричного температурного поля. Это можно объяснить тем, что температурный интервал нагружения частично совпал с диапазоном рабочих температур, при котором процесс распухания происходит наиболее интенсивно (для металлов, это значение лежит в пределах от $0.2T_m$ до $0.6T_m$, T_m – температура плавления). Также следует отметить, что картина радиационного распухания на первом участке (при $\rho < 1/3$), имеет равномерный характер как по радиусу так и по окружности для всех амплитудных значений $A < 80$. На втором и третьем участках изменение параметра A существенно сказывается на распределении радиационных деформаций $S[T(r,\theta), \Phi]$ (до 30%) и наблюдается сдвиг кривых объемных деформаций на этих участках в сторону продольной оси. Распределение объемного

радиационного распухания по периметру модельного тела при различных амплитудных значениях окружной неравномерности показано ниже на рисунке 6.

Таким образом, при облучении и неосесимметричном нагреве материал будет подвержен значительному неоднородному распуханию. Учет этой неравномерности, появляющейся в увеличении объемной деформации, и снижает максимальные сжимающие напряжения на 30%, что хорошо видно на графиках рисунков 2 и 4. С одной стороны такое снижение максимальных напряжений при неупругой работе материала, позволяет повысить допустимую величину терморadiационной нагрузки, но с другой стороны необходимо следить, чтобы растягивающие напряжения, возникающие при данном значении флюенса и температуры, не приводили к разрушению тела в зоне растяжения. Численные эксперименты показали, что большой флюенс нейтронов и высокая рабочая температура делает совершенно необходимыми дальнейший учет вязких деформаций тела, причем для описания ползучести должна использоваться теория, адаптированная для неосесимметричной модели деформирования в общем случае включающая как радиационную, так и термическую составляющую. Так, если при расчете холодных сечений целесообразно учитывать только радиационную ползучесть, то в горячих сечениях необходимо принимать во внимание как радиационную, так и тепловую составляющие необратимого деформирования.

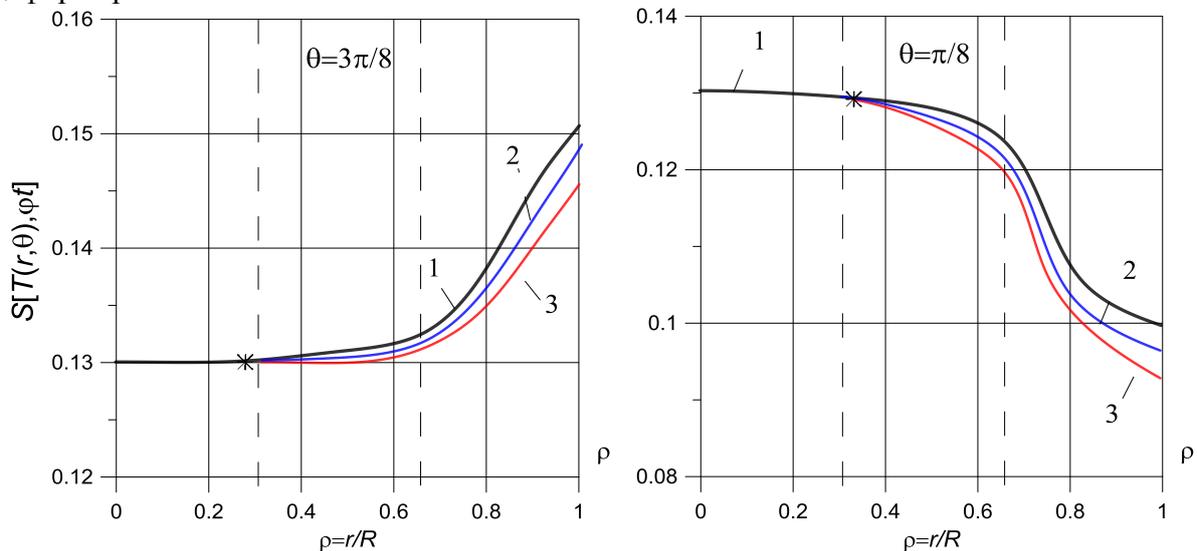


Рисунок 6. – Радиационное распухание в холодных (а) и горячих сечениях (б) стального цилиндра за 5000 ч облучения потоком быстрых нейтронов ($\bar{E} > 0.1$ МэВ) плотностью $\theta = 2.81 \cdot 10^{19}$ нейтрон/(см²·ч) и неосесимметричном нагреве (1) при различных значениях окружной неравномерности температур: 1 – $A=50$; 2 – $A=60$; 3 – $A=70$

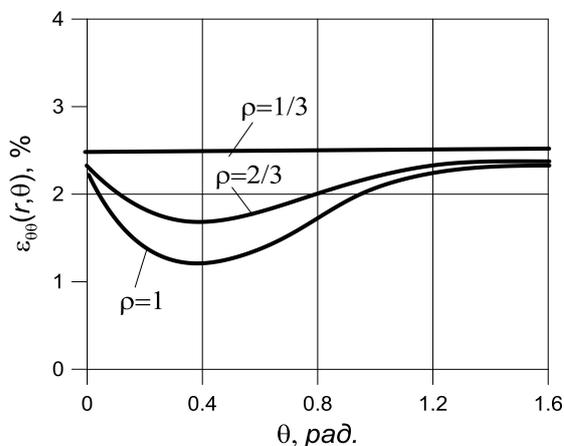


Рисунок 7. – Распределение окружных деформаций по периметру цилиндра в случае неосесимметричного температурного поля (4.2) с $A=50$ для $t=4000$ ч облучения

На рисунках 7 и 8 показано распределение деформаций по периметру модельного тела. Как можно заметить из эпюр рисунка 7, распределение деформаций в горячих сечениях ($\theta = [0; \pi/4]$), резко неоднородно, что обусловлено большой тепловой ползучестью в неосесимметричном тепловом поле (1). В холодных сечениях основной вклад вносит радиационная ползучесть, слабо зависящая от температуры. Поэтому в сечениях $\theta = [\pi/4; \pi/2]$ распределение деформаций близко к равномерному.

На эпюрах рисунка 8 показано изменение во времени полных окружных деформаций на внешнем, центральном и внутреннем участках для рассматриваемых горячих и холодных сечений.

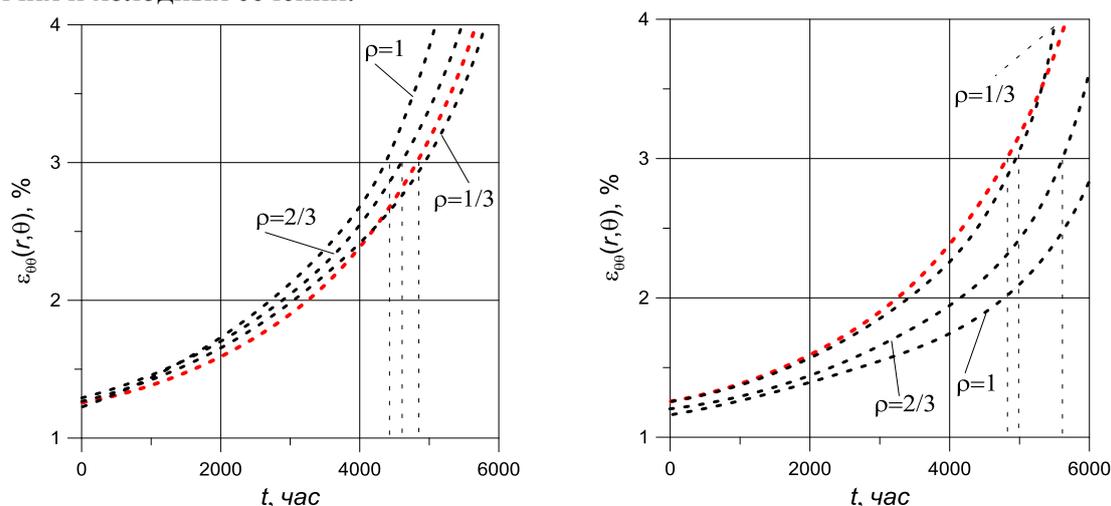


Рисунок 8. – Изменение максимальных окружных деформаций во времени для холодных ($\theta=3\pi/8$) и горячих ($\theta=\pi/8$) сечений с учетом (—) и без учета (---) окружной неравномерности температуры ($A=50$)

Если принять допускаемую деформацию равной $[\varepsilon]=3\%$, то для холодного сечения допускаемый ресурс времени $[t]$ при учете и без учета окружной неравномерности температур, как показано на рисунке 8(а) изменится незначительно от 4500 до 4900. Максимум отклонения $[t]$ составляет 350ч для внешнего ($2/3 \leq \rho \leq 1$), 250ч для центрального ($1/3 \leq \rho \leq 2/3$) и 50ч для внутреннего ($0 \leq \rho \leq 1/3$) участков. В тоже время для горячих сечений (рисунок 8, б) окружная неравномерность температур дает существенный вклад при оценке работоспособности: максимум отклонения $[t]$ для внешнего участка составляет 1150ч, а для центрального 750ч. Для внутреннего участка допускаемый ресурс времени $[t]$ при учете и без учета окружной неравномерности температур изменится незначительно от 4850ч до 4950ч. Как видно, величина деформаций в осесимметричной задаче больше, чем неосесимметричной. Таким образом, оценкой деформаций в горячих сечениях по осесимметричной модели можно пользоваться даже с некоторым запасом. В холодных сечениях деформации отличаются незначительно, так как в этом случае основной вклад в неупругие деформации вносят распухание и радиационная ползучесть, которые в случае двух моделей близки по величине.

Результаты серии виртуальных испытаний свидетельствуют о том, что окружная неравномерность температур существенно ухудшит работоспособность холодных сечений ($\theta=[\pi/4;\pi/2]$) со временем. Следует отметить, что особенно большое влияние оказывает неравномерное по окружности распределение температуры для больших флюенсов нейтронов $\Phi_{max}=10^{27}$ нейтрон/м². Учитывая то, что возникающие при указанных флюенсах деформации стали существенно зависят от температуры, очевидно, что неравномерное распределение последней и вызывает резко неравномерное по окружности распухание. В результате чего материал подвержен дополнительным необратимым деформациям в кольцевом направлении. Таким образом, из серии проведенных расчетов можно предположить, что для конструкционного материала флюенс нейтронов является основным фактором, влияющим на величину напряжений, а при его больших величинах, приводящих к радиационным деформациям более чем 3%, расчеты следует проводить с учетом радиационной ползучести. Численные эксперименты показали, что изменение окружной координаты незначительно влияет на величину напряжений при амплитудном значении неравномерности $2A < 20$. Причем увеличение $2A$ с 20 до 30 снижает величину радиальных и тангенциальных напряжений на 4%, а максимальное

расхождение с осесимметричной моделью составляет 9% (при $\rho=1$). Дальнейшее изменение амплитудного значения окружной неравномерности, например, при $2A>40$ довольно сильно сказывается на максимальных значениях напряжений, особенно окружных. Анализ результатов показал, что использование осесимметричной модели НДС завышает деформации в горячих сечениях и занижает напряжения в холодных сечениях стального цилиндра по сравнению с неосесимметричной моделью. Для холодных сечений накопленные деформации отличаются незначительно, т.к. в этом случае основной вклад вносят радиационные деформации, которые в холодных сечениях в обоих случаях $1D(r)$ и $2D(r,\theta)$ моделях близки по величине. При этом, выявляется, что в случае горячих сечений, накопленные деформации по осесимметричной модели несколько больше, чем по неосесимметричной методике. В связи с этим, можно предположить, что оценкой неупругих деформаций по $1D$ модели можно пользоваться с некоторым запасом с точки зрения работоспособности конструкции.

Проведенные исследования дают также основания сделать несколько важных выводов при изучении неосесимметричного НДС в условиях неравномерного нагрева и облучения.

- На начальных этапах нагружения терморadiационные напряжения в плоскости сечения сплошного цилиндрического тела в основном определяются тепловыделением и механической нагрузкой. Если тепловыделение отсутствует, то поперечные напряжения малы и определяются только механической нагрузкой, а продольные дополнительно зависят от поля температур. Причем для неосесимметричной термической задачи для сплошного цилиндра из конструкционного материала (без внутренних источников тепловыделения) поперечные напряжения равны нулю, а продольные полностью определяются неравномерностью температурного поля.

- В то же время для терморadiационной задачи напряженное состояние в поперечном сечении цилиндра отлично от нуля, как при наличии, так и при отсутствии внутреннего тепловыделения в модельном теле односвязной геометрии. А уровень напряжений в конструкционном материале в первую очередь определяется флюенсом нейтронов.

- Полученные данные свидетельствуют о том, что градиент температуры по периметру не сказывается на температурных напряжениях в сплошном цилиндре без внутренних источников тепла (конструкционный материал), но сказывается на радиационных напряжениях и терморadiационном НДС. Таким образом, градиент температуры по периметру существенно влияет на прочностные характеристики длинных тел односвязной цилиндрической геометрии при радиационном облучении.

- Окружная неравномерность ($2A<50$), сильно сказывающаяся на поверхности цилиндрического тела (вплоть до $\rho=2/3$) заметно сглаживается при $1/3<\rho<2/3$, а при $\rho<1/3$ различие снижается до нуля.

- Для конструкционного материала при значениях параметра окружной неравномерности $2A<20$, определение НДС можно проводить по осесимметричной модели (различие 4-5%). При больших величинах окружной неравномерности температур расчеты следует проводить по неосесимметричной модели (расхождение более чем 5%). Таким образом, при решении практических задач окружную неравномерность в некоторых случаях (для упрощения) можно не учитывать.

- В тоже время, в общем случае решение неосесимметричной задачи определения НДС не может быть заменено решением ряда осесимметричных задач в соответствующих меридиональных сечениях, так как это может привести к количественно и качественно неверным результатам.

Отметим, что также как и в задаче [2] по определению термоупругого состояния сплошного цилиндра без внутренних источников тепловыделения, неосесимметричное

температурное поле $T(r, \theta)$ не вызвало кроме продольных появления каких-либо других напряжений в сечении модельного тела. Этот факт согласуется с аналогичными аналитическими решениями для неосесимметричных стационарных термических задач, представленных Н.И. Мухелишвили на основании дислокационной аналогии [19]. Упомянутый автор впервые установил, что в свободном односвязном цилиндрическом теле без внутренних источников тепловыделения не возникает напряжений в поперечном сечении. В этой связи, предлагаемые общие терморadiационные решения можно считать расширением известных термоупругих решений на сплошные среды с нелинейными свойствами в условиях сложного немеханического нагружения.

Разработанная механико-математическая модель и общая методика определения неосесимметричного НДС, в процессе программного моделирования и отладки компьютерных расчетных средств, тестировались на соответствующих классических решениях для цилиндрических тел, представленных в работах [19–21]. Таким образом, решение ряда тестовых и модельных задач дает хорошее совпадение полученных численных результатов с известными решениями и расчетными данными других авторов [9–18]: для различных параметров отклонение составляет от 4.6% до 9% соответственно. Оценка точности выполнялась путем вычисления относительной погрешности.

РЕЗЮМЕ

Общий случай неосесимметричного терморadiационного НДС значительно отличается от осесимметричного, а решение неосесимметричной задачи деформирования не может быть заменено решением ряда осесимметричных задач в соответствующих меридиональных сечениях. Если осесимметричные модели НДС дают представление об интегральных изменениях в цилиндрическом теле, то неосесимметричная $2D(r, \theta)$ модель позволяет провести анализ его состояния в любой материальной точке как по радиусу, так и по периметру сечения с возможностью дальнейшей оценки прочности на основе того или иного критерия. Данные проведенных численных экспериментов свидетельствуют о том, что градиент температуры по периметру не сказывается на температурных напряжениях в сплошном цилиндре без внутренних источников тепла (конструкционный материал), но сказывается на радиационных напряжениях и терморadiационном НДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширвель, П.И. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению / П.И. Ширвель, И.С. Куликов // Машиностроение: респ. межвед. сб. в 2 т. – Минск: БНТУ, 2009. – Вып. 24, т. 1. – С. 185–191.
2. Куликов, И.С. Решение неосесимметричной задачи термоупругости для неравномерно нагретого длинного цилиндра в условиях ползучести / И.С. Куликов, П.И. Ширвель // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 4. – С. 75–80.
3. Ширвель, П.И. Определение неосесимметричного НДС длинного сплошного цилиндра в условиях ползучести и облучения / П.И. Ширвель // «Математическое моделирование и краевые задачи»: тр. VII Всероссийской науч. конф. с междунар. участием, Самара, 3–6 июля 2010 г.: в 2 ч. – Самара: СамГТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 395–398.
4. Ширвель, П.И. Модель расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях пластичности и ползучести / П.И. Ширвель, И.С. Куликов // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2012. – № 4. – С. 51–62.
5. Ширвель, П.И. Решение радиационно-термоупругой задачи для сплошного цилиндра / П.И. Ширвель // Теоретическая и прикладная механика: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2008. – Вып. 23. – С. 55–63.

6. Ширвель, П.И. О численных методах исследования напряжено-деформированного состояния тепловыделяющих элементов АЭС / П.И. Ширвель // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. Приложение. – 2010. – Т. 5. – С. 226–235.
7. Чигарев, А.В. Исследование неосесимметричного напряженного состояния при квазистатическом термосиловом нагружении в условиях облучения высокоэнергетическими частицами / А.В. Чигарев, П.И. Ширвель // Наука и Техника. – 2013. – №4. – С.46–53.
8. Ширвель, П.И. Неосесимметричное напряженно-деформированное состояние длинного тепловыделяющего цилиндра в условиях квазистатического терморadiационного воздействия / П.И. Ширвель, И.С. Куликов, А.В. Чигарев// Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 79–85.
9. Лихачев, Ю. И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю. И. Лихачев, В. Я. Пупко. - М.: Атомиздат, 1975. - 280 с.
10. Olander, D. R. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements/ D.R. Olander. – USA: Technical Information Center Energy Research and Development Administration, 1976. – 720p.
11. Тутнов, А. А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 183 с.
12. Тутнов, А. А. Математическое моделирование поведения теплофизических, прочностных и надежностных характеристик твэлов энергетических реакторов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.03 / А.А. Тутнов, Рос. науч. центр "Курчат. Ин-т", Ин-т реактор. технологий и материалов. - М., 1998. - 54 с.
13. Куликов, И. С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В. Б. Нестеренко. - Минск: Наука и техника, 1984. - 103с.
14. Hall, M.M. Errata to: “Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Part I: continuum plasticity model”, Journal of Nuclear Materials 396 (2010) 112–118 and “Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Part II: experimental results”, Journal of Nuclear Materials 396 (2010) 119–129 / M.M. Hall Jr// J. of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 412, №2. – P. 278–279.
15. Karthik, V. Austenitic Stainless Steels for Fast Reactors - Irradiation Experiments, Property Evaluation and Micro structural Studies / V. Karthik, S. Murugan, P. Parameswaran, C.N. Venkiteswaran, K.A.Gopal, N.G. Muralidharan, S. Saroja and K.V. Kasiviswanathan // Energy Procedia. – 2011. – Vol.7. – P.257–263.
16. Рябов, В. М. Действие излучения на конструкционные материалы/В.М. Рябов. - 2-е изд., доп. - М.: МЭИ, 1990. - 58 с.
17. Киселевский, В. Н. Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов / В. Н. Киселевский. - Киев: Наук. думка, 1990. – 163с.
18. Аль-Самави, А. Х. Радиационное распухание металлов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / А. Х. Аль-Самави - Барнаул, 2004. – 121 л.
19. Купрадзе, В. Д. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости: Классич. и микрополярная теория. Статика, гармон. колебания, динамика. Основы и методы решения / В.Д. Купрадзе, Т.Г. Гегелиа, М.О. Башелейшвили, Т.В. Бурчуладзе. – М.: Наука, 1976. – 663 с.
20. Колтунов, М. А. Упругость и прочность цилиндрических тел.-М.: Высш. школа, 1975.–526 с.
21. Лебедев, Н. Н. Температурные напряжения в теории упругости. – М. – Л.: Онти, 1937.–110 с.

SUMMARY

A new model of 2D (r,θ) asymmetric stress/strain state taking into account the change of displacements, stresses and strains as a function of radial and circumferential coordinates has been suggested. The numerical solution to solve stress/strain state problem under creep, swelling and thermal strain has been obtained. The method of the numerical analysis has been offered. The original algorithms and computer software for solutions of 1D(r) and 2D (r,θ) stress/strain state under creep and nuclear radiation have been realized. The analysis of the mechanisms of nonlinear asymmetric deformation for cylindrical bodies was produced. Optimization performance characteristics of quasistatic loading of fast neutron flux and establish the optimal properties of the irreversible deformation processes for asymmetric stress/strain state have been done.

E-mail: Pavel.Shirvel@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2013