

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЖОНСОНА-КУКА В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ БРОСКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ОЯТ

А.В. Соболев*, М.В. Радченко**

** Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1*

*** АО «Инженерный центр ядерных контейнеров»
123298, Москва, ул. Маршала Бирюзова, д. 1, корп. 1*



Изложены результаты численного моделирования деформаций и повреждений при падении транспортного упаковочного комплекта для перевозки ОЯТ ТУК-128 на штырь. Такая ситуация относится к проектным авариям при перевозке ОЯТ наземным транспортом за пределами опасного производства (вне площадки АЭС или перерабатывающего завода).

Расчет и моделирование деформаций при падении контейнера выполнен в упругопластической области работы конструкционных материалов. Результаты моделирования в значительной мере зависят от выбора способа задания пластических свойств материалов.

Наиболее распространенный подход учета пластичности состоит в задании табулированной функции, устанавливающей связь напряжений и пластических деформаций. Такое представление пластичности не учитывает ни температурной зависимости свойств пластичности, ни кинематического упрочнения материала (зависимости предела упругости от интенсивности деформаций). Однако использование этой модели дает существенное снижение вычислительной сложности, что важно при необходимости проведения оценочного анализа для десятков расчетных вариантов.

Более адекватным подходом к заданию пластичности является учет изменения предела упругости не только в зависимости от величины деформаций и ее интенсивности, но и от температуры (модель пластичности Джонсона-Кука). В этом случае для каждого типа конструкционного материала необходимо определить пять-семь параметров. В настоящее время нет однозначного способа для определения этих параметров, поэтому в статье предлагается метод для их нахождения. Такой подход приводит к существенному увеличению вычислительной сложности, поэтому в рамках представленной работы дается сравнительный анализ результатов расчетов с заданием пластичности моделью Джонсона-Кука и табулированной функцией.

Моделирование выполнено для двух случаев: падение на крышку корпуса, изготовленную из нержавеющей стали, и падение на днище корпуса, изготовленного из высокопрочного чугуна. Рассматриваемые варианты задания пластических свойств конструкционных материалов сравниваются с результатами бросковых испытаний контейнера ТУК-128. Для моделирования удара использовались метод конечных элементов и программный комплекс LS-DYNA.

Ключевые слова: контейнер ОЯТ, падение на штырь, модель пластичности Джонсона-Кука, определение параметров модели пластичности Джонсона-Кука.

ВВЕДЕНИЕ

Этап транспортирования ОЯТ с площадки АЭС к месту переработки и (или) длительного хранения является неотъемлемой частью ядерного топливного цикла. На этом этапе требуется обеспечение безопасности всех типов (ядерной, радиационной). Одной из рассматриваемых в проектах контейнеров для транспортирования ОЯТ аварий является падение на штырь с однометровой высоты. Эта авария эквивалентна падению контейнера с железнодорожного вагона на стрелку. Важно, что при такой гипотетической аварии может произойти потеря плотности внутреннего объема контейнера и выход радиоактивных веществ наружу. Поэтому моделирование и анализ таких аварий актуален и важен как в России, так и за ее пределами [1, 4]. В свою очередь, задание свойств материала контейнера ОЯТ и используемые модели пластичности и разрушения определяют всю расчетную картину. В зависимости от выбранной модели возможны смещения модельных результатов как в сторону излишней консервативности, так и в сторону излишней оптимистичности [5].

МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

Модели, описывающие поведение металла при пластических деформациях, имеют существенные различия как по качественному представлению физики процесса, так и по исходным данным для них, их качества и количества. Признается, что наиболее точное описание пластических деформаций с точки зрения физики явлений и количественных характеристик дает дислокационная модель пластичности. Однако получить качественные исходные данные для ее использования практически невозможно. Существует ряд моделей пластических деформаций металлов, получивших наибольшее распространение – например, модель билинейной пластичности, табулированное задание пластических деформаций и ряд других [6 – 14]. Но большинство из этих моделей не учитывают явления кинематического упрочнения. Другими словами, не учитывается влияние интенсивности деформаций на предел текучести. Кроме того, при высоких скоростях деформаций возможно явление адиабатического разогрева металла в зоне наибольших деформаций и, соответственно, его локальное разупрочнение [15]. Из известных моделей пластических деформаций материала наибольшей привлекательностью обладает модель Джонсона-Кука, учитывающая как кинематическое упрочнение, так и адиабатический разогрев деформируемого материала. Однако существуют некоторые сложности с определением параметров этой модели. В частности, в разных источниках могут приводиться разные параметры модели для одного и того же материала [16, 17]. Поэтому возникла необходимость разработки методики определения параметров модели пластичности Джонсона-Кука и сравнения полученных результатов с моделью табулированной функции пластичности и результатами испытаний.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА ДЖОНСОНА-КУКА

Модель Джонсона-Кука является эмпирической и позволяет учитывать эффекты изотропного (статического) упрочнения, кинематического упрочнения, изменение температуры и связанное с этим изменение прочности. В этой модели напряжение пластической деформации определяется формулой [18]

$$\sigma_Y = \left(A + B \cdot \varepsilon_p^n \right) \times \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\varepsilon_p'^n}{\varepsilon_0'} \right) \right) \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

где ε_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; $A, B, C, n, m, \varepsilon_0$ – параметры модели. Штрих означает производную по времени. Формула (1), по сути, представляет собой кривую деформирования материала.

Определение параметров модели (1) выполняется на основе информации о пластических деформациях материала при разных интенсивностях деформирования и температурах. Рассмотрим методику определения параметров модели (1).

Параметр A модели (1) является величиной предела текучести при медленном нагружении. По сути, параметр A есть предел текучести при заданной температуре $R_{0,2}$ [19]. Соответственно, следует принимать величину $A = R_{0,2}$ при комнатной температуре.

Параметр m учитывает явление термического разупрочнения материала. Величина этого параметра может быть получена на основании данных о $R_{0,2}$ при разных температурах. Преобразование выражения (1) при отсутствии пластических деформаций дает

$$\sigma_Y = A \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right).$$

Подставляя значения $\sigma_Y = R_{0,2}$ для разных температур T и приравнивая по параметру A , получим

$$R_{0,2}^{20} / \left(1 - \left(\frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) = A = R_{0,2}^T / \left(1 - \left(\frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$

или

$$R_{0,2}^{20} / R_{0,2}^T = \left(1 - \left(\frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) / \left(1 - \left(\frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right).$$

Последнее соотношение дает оценку величины параметра m модели (1).

Параметры B и n модели материала Джонсона-Кука отвечают за изотропное (статическое) упрочнение при деформациях. Определение этих параметров выполняется на основании данных о поведении материала при медленном (квазистатическом) нагружении. Преобразование выражения (1) для медленного (квазистатического) нагружения дает

$$\sigma_Y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right). \quad (2)$$

Подстановка данных для температуры $T = T_{kvasist}$ и деформации ε_1 (напряжение σ_1) даст

$$\sigma_1 = (A + B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_1)^n) \cdot k_t$$

или

$$\sigma_1 / k_t - A = B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_1)^n. \quad (2a)$$

Выражение (2) для температуры $T = T_{kvasist}$ и деформации ε_2 (напряжение σ_2) даст

$$\sigma_2 = (A + B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_2)^n) \cdot k_t$$

или

$$\sigma_2 / k_t - A = B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_2)^n. \quad (2b)$$

Из решения системы уравнений (2а) и (2б) получаем параметры B и n модели (1):

$$B = (\sigma_2 / k_t - A) / (\varepsilon = \varepsilon_2)^n; \quad n = \log_{(\varepsilon_1/\varepsilon_2)} ((\sigma_1 - A) / (\sigma_2 - A)).$$

Оставшийся параметр C модели материала Джонсона-Кука отвечает за кинематическое упрочнение (т.е. за учет интенсивности деформаций). Он оценивается по данным о влиянии скорости деформации на напряжения.

Пусть для температуры $T = T_{kinemat}$ и деформации $\varepsilon = \varepsilon_{kinemat}$ при скорости деформации $\dot{\varepsilon}' = \dot{\varepsilon}'_1$ напряжение составляет σ_1 , а для скорости деформации $\dot{\varepsilon}' = \dot{\varepsilon}'_2 - \sigma_2$. Учитывая (1), получаем

$$\sigma_2 / \sigma_1 = (1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}'_2^n / \dot{\varepsilon}'_0)) / (1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}'_1^n / \dot{\varepsilon}'_0)),$$

откуда находим оценку величины C :

$$C = (\sigma_2 / \sigma_1 - 1) / (\ln(\dot{\varepsilon}'_2^n / \dot{\varepsilon}'_0) - \sigma_2 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}'_1^n / \dot{\varepsilon}'_0) / \sigma_1). \quad (3)$$

Модель Джонсона-Кука работает в связке с уравнением состояния, позволяющим учитывать гидродинамическое поведение материала. Оно определяет соотношение между переменными состояния и состоянием вещества. Обычно это зависимость термодинамической характеристики (например, давления) от двух других независимых параметров состояния (например, плотности и внутренней энергии).

Задание уравнения состояния металлов, в основном, разделяется на две составляющие – холодное и тепловое давление:

$$P(\mu, W) = P_C(\mu) + P_T(\mu, W), \quad (4)$$

где $\mu = \rho / \rho_0 - 1$; ρ – текущая плотность; ρ_0 – начальная плотность; W – удельная объемная внутренняя энергия материала.

Холодное давление $P_C(\mu)$ является функцией плотности и оценивается вдоль изотермы 0 К. Тепловое давление $P_T(\mu, W)$ зависит как от плотности, так и от удельной объемной внутренней энергии материала. Для сжатого материала $\mu > 0$, а для растянутого $\mu < 0$. В рамках комплекса LS-DYNA, использованным при моделировании, наиболее простое уравнение состояния для металлов задается полиномом вида

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) W, \quad (4а)$$

где C_1 – объемный модуль упругости (линейная объемная вязкость); $C_4 = C_5 = 0$; W , Дж/м³ – объемная внутренняя энергия; $C_0 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$.

Дополнительные параметры модели Джонсона-Кука включают в себя C_p , Дж/(кг·К) – удельную теплоемкость; E , Па – модуль Юнга; G , Па – модуль упругости второго рода; ν – коэффициент Пуассона; $P_{cut-off}$, Па – давление скалывания.

Параметры модели материала Джонсона-Кука для стали 12Х18Н10Т и стали 20 определены на основании данных из [19, 20]. В [20] для стали 12Х18Н10Т использовались данные эквивалентной стали 12Х18Н9Т. Параметры модели Джонсона-Кука для высокопрочного чугуна определены на основании экспериментальных данных. Полученные значения параметров модели (1) для указанных материалов сведены в табл. 1.

Дополнительно включены параметры модели материала: $T_r = 293$ К – комнатная температура; $P_{cut-off} = -1,2 \cdot 10^9$ Па – давление скалывания.

Таблица 1

Параметры модели Джонсона-Кука для материалов контейнера ОЯТ

Параметр модели материала	Сталь 12Х18Н10Т	Чугун ВЧ-40	Материал штыря (сталь 20)
A, МПа	196	253,7	245
B, МПа	615,5	638,9	2988,2
<i>n</i>	0,7005	0,4969	0,755
C	0,04071	0,26573	0,2657
<i>m</i>	1,479	1,037	1,097
G, ГПа	76	64,8	82
<i>v</i>	0,28	0,25	0,30
E, ГПа	195	162	212
<i>C_p</i> , Дж/(кг·К)	462	525	486
<i>C₁</i> , ГПа	148	108	177
<i>T_m</i> , К	1573	1523	1573
<i>W</i> , Дж/м ³	1,01·10 ⁹		

МОДЕЛЬ ТАБУЛИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ПЛАСТИЧНОСТИ С УЧЕТОМ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА

В рамках среды LS-DYNA возможно задание пластических свойств материалов в табулированном виде. Кривая деформации задается таблично в виде соотношений деформация-напряжение. Дополнительно задается предельная деформация перед разрушением. Для задания свойств материалов использовались данные [19].

АВАРИЯ С ПАДЕНИЕМ ДНИЩЕМ КОРПУСА НА ШТЫРЬ

По результатам натурных испытаний контейнера ОЯТ (здесь и далее рассматривается транспортный упаковочный комплект ТУК-128) сформировались повреждения в виде вмятины днища корпуса и деформации штыря. Результаты представлены в табл. 2. Здесь же даны результаты моделирования с использованием модели пластичности Джонсона-Кука и табулированного задания зависимости напряжений от пластических деформаций (модели кусочно-линейной деформации).

Таблица 2

Результаты сравнения численных моделей с испытаниями контейнера при падении днищем корпуса на штырь

		Модель Джонсона-Кука	Модель кусочно-линейной деформации	Испытания
Вмятина днища корпуса	диаметр, мм	180	270	160
	глубина, мм	2,39	4,7	2
Деформации штыря	диаметр, мм	3	1,7	1,2
	высота, мм	14	2,4	2,7

Моделирование выполнено методом конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA. Расчетная модель представлена на рис. 1. Свойства материалов, использованных при численном моделировании, приведены в табл. 1.

Повреждения корпуса, полученные при испытаниях, лучше всего представляет модель Джонсона-Кука с параметрами, рассчитанными по указанной выше методике. В то же время модель задания табулированной функции пластической деформации имеет значительные расхождения с результатами испытаний.

Отклонения номинальной модели Джонсона-Кука от результатов испытаний составляют 20% по глубине вмятины и 13% по диаметру вмятины. Важно отметить, что в имеющихся в распоряжении данных по результатам испытаний нет описания способа измерения диаметра вмятины и ее глубины. Это вносит дополнительные неопределенности и затрудняет сравнение с результатами моделирования.

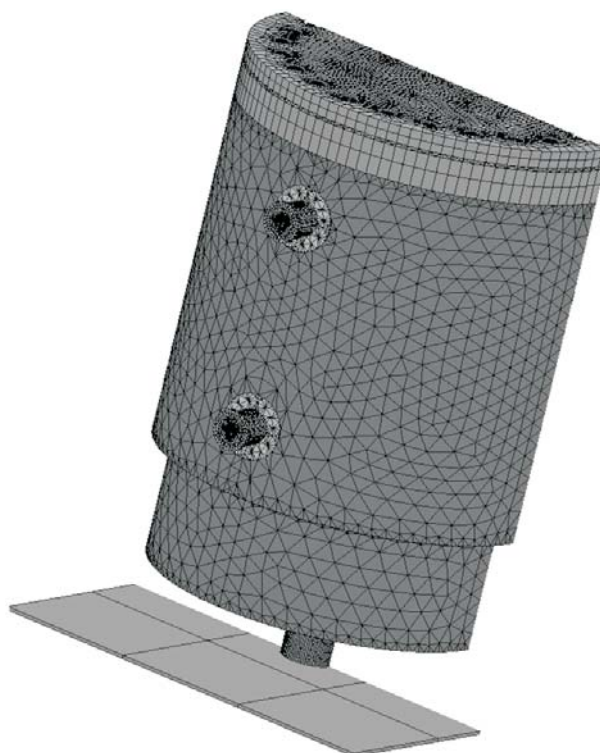


Рис. 1. Расчетная модель

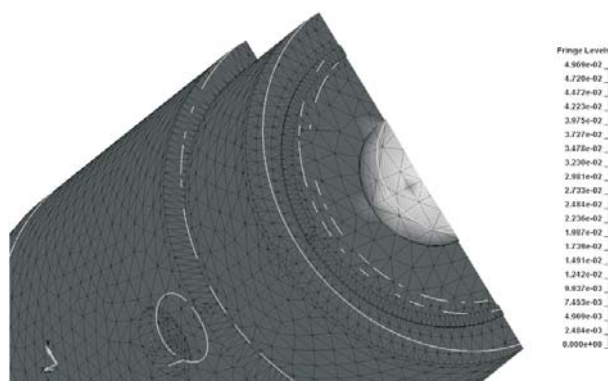


Рис. 2. Пластические деформации фрагмента корпуса (мм/мм)

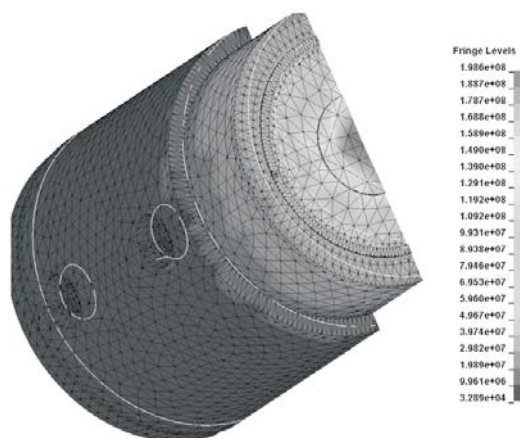


Рис. 3. Эквивалентные напряжения фрагмента корпуса (Па)

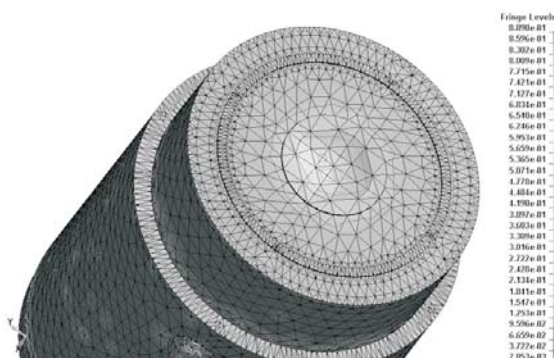


Рис. 4. Пластические деформации фрагмента корпуса для модели чугуна Джонсона-Кука (мм/мм)

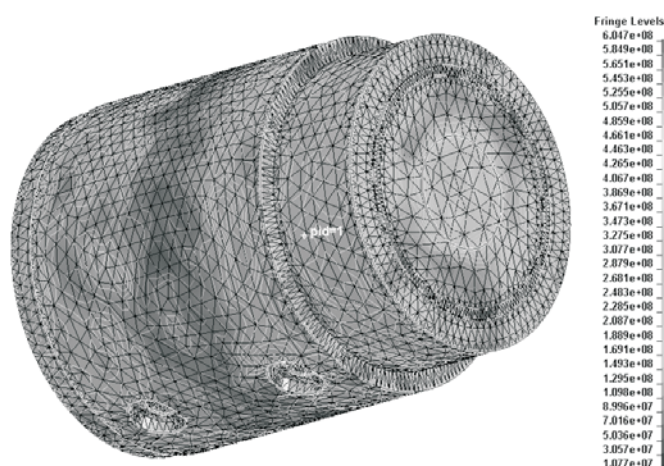


Рис. 5. Эквивалентные напряжения фрагмента корпуса (Па) для модели чугуна Джонсона-Кука

Результаты расчетов, представленные на рис. 2 – 5, получены с помощью программного комплекса Ansys. Расчетные пластические деформации модели табули-

рованной функции пластичности, в соответствии с рис. 2, достигают 5%. Для модели Джонсона-Кука пластические деформации достигают 89% (рис. 4). Эквивалентные напряжения для модели табулированного задания пластичности (199 МПа, рис. 3) меньше, чем для модели Джонсона-Кука (605 МПа, рис. 4).

АВАРИЯ С ПАДЕНИЕМ НА ШТЫРЬ КРЫШКОЙ

В ходе испытаний контейнера с падением на штырь крышкой формируются повреждения в виде вмятины наружной крышки корпуса и деформации штыря. Результаты представлены в табл. 3. Здесь же приводятся результаты численного моделирования с использованием модели пластичности Джонсона-Кука.

Таблица 3

Результаты сравнения численного моделирования с испытаниями контейнера при падении контейнера на штырь крышкой

		Модель Джонсона-Кука	Испытания
Вмятина крышки корпуса	диаметр, мм	220	160
	глубина, мм	4,2	2
Деформации штыря	диаметр, мм	1,8	1
	высота, мм	3	2,4

- Расчетные пластические деформации модели Джонсона-Кука достигают
- 7,5% для штыря;
 - 4,2% для внутренней крышки;
 - 2,9% для болтов внутренней крышки;
 - 12,2% для кольца внутренней крышки.

Распределение пластических деформаций по наружной крышке контейнера приводится на рис. 6, где отчетливо виден контур формирования вмятины от удара о штырь. Не менее важно, что значительных пластических деформаций самой крышки не происходит, кроме места удара, т.е. при ударе крышка испытывает пластические деформации в месте контакта со штырем, а в остальной области деформируется, преимущественно, упруго.

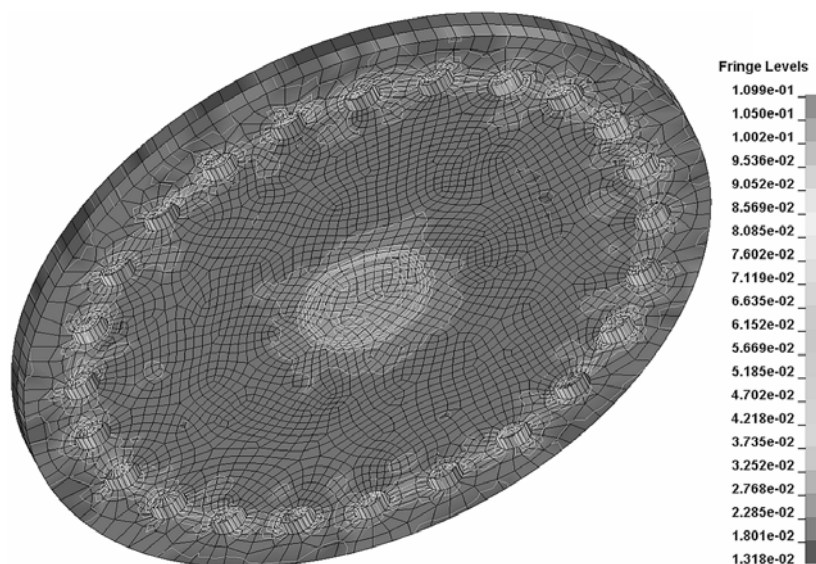


Рис. 6. Пластические деформации наружной крышки для модели чугуна Джонсона-Кука (мм/мм), полученные в программном комплексе Ansys.

- Наибольшие эквивалентные напряжения модели Джонсона-Кука составляют
- 319 МПа для наружной крышки;
 - 213 МПа для внутренней крышки;
 - 540 МПа для болтов внутренней крышки;
 - 282 МПа для кольца внутренней крышки.

В данном случае штырь испытывает меньшие деформации в сравнении с падением на штырь днищем корпуса. Это обусловлено поглощением энергии деформации наружной крышки. Так остаточный выгиб наружной крышки составляет примерно 10 мм. При падении на штырь днищем таких деформаций днища не происходит. Кроме того, само днище имеет большую толщину, чем наружная крышка, т.е. большую жесткость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы по моделированию бросковых испытаний контейнера для транспортирования ОЯТ выполнено моделирование падений контейнера на штырь крышкой и днищем.

Для моделирования использовались две модели задания пластических деформаций материалов: модель Джонсона-Кука и табулированное задание пластических деформаций. По результатам модельных расчетов падений на штырь лучше согласуется с результатами бросковых испытаний задание пластичности с помощью модели Джонсона-Кука. Задание пластических свойств материалов с помощью модели Джонсона-Кука приводит к завышению деформаций в пределах 15%. На это указывает [5], утверждая, что при использовании модели материала Джонсона-Кука для штыря, амплитуда реакционных сил и деформаций контейнера завышается. Также увеличивается длительность удара. Дополнительную неопределенность в сравнении результатов моделирования с данными испытаний вносит отсутствие данных о методике замера величины остаточных деформаций корпуса и крышки в месте удара после испытаний.

В целом, задание пластических свойств металлов моделью Джонсона-Кука дает более качественные и реалистичные результаты. Однако напряжения и другие функционалы деформаций достигают больших величин в сравнении с табулированным заданием пластичности.

Литература

1. *Droste B.* Testing of type B packages in Germany to environments beyond regulatory test standards // *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material.* – 2007. – Vol. 18. – № 2. – PP. 73–85.
2. *Musolf A., Quercetti T., Mьller K., Droste B., Komann S.* Drop test program with the half-scale model CASTOR HAW/TB2 / – PATRAM 2010.
3. *Боровков А.И., Грунин В.В., Лутман Ю.Л.* Исследование вертикального падения контейнера с отработавшим ядерным топливом // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.* – 2013. – № 1. – С. 210-214.
4. *Нормы МАГАТЭ по безопасности. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности.* № TS-R-1, 2005. – М.: Энергоатомиздат. – 2009.
5. *Jaksic N., Nilsson K.-F.* Finite element modelling of the one meter drop test on a steel bar for the CASTOR cask // *Nuclear Engineering and Design.* – 2009. – Vol. 239. – No. 2. – PP. 201-213.
6. *Невский С.А., Сарычев В.Д., Комиссарова И.А., Громов В.Е.* Многофазная модель пластической деформации металлов // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.* – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1848-1849.
7. *Колмогоров В.Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия. – 1970. – 229 с.
8. *Мастеров В.А., Берковский В.С.* Теория пластической деформации и обработка металлов давлением. – М.: Металлургия. – 1989. – 400 с.

9. *Скуднов В.А.* Предельные пластические деформации металлов. – М.: Металлургия. – 1989. – 176 с.
10. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия. – 1986. – 224 с.
11. *Богатов А.А., Мижирецкий О.И., Смирнов С.В.* Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия. – 1984. – 144 с.
12. *Унксов Е.П.* Теория пластических деформаций металлов. – М.: Машиностроение. – 1983. – 598 с.
13. *Иванов К.М., Лясников А.В., Новиков Л.А., Юргенсон Э.Е.* Математическое моделирование процессов обработки давлением. – СПб.: Инвентекс. – 1997. – 268 с.
14. *Боткин А.В.* Научно-методические основы проектирования процессов углового пресования. Дисс. д.т.н. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2013. – 282 с.
15. *Qiao L., Zencker U., Musolff A., Komann S.* Dynamic Finite Element Analyses of a Spent Fuel Transport and Storage Cask with Impact Limiters by 9 Meter Drop Tests. – SIMULIA Customer Conference, 2011.
16. *Schwer L.* Optional Strain-Rate Forms for the Johnson-Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon0. / VI-th European LS-DYNA Users' Conference. – 2007.
17. *Trana E., Zecheru T., Bugaru M., Chereches T.* Johnson-Cook Constitutive Model for OL 37 Steel. / VI-th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering. – Venice, Italy, Nov 21-23, 2007. – PP. 269-273.
18. *Кузькин В.А., Михалюк Д.С.* Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, – № 1. – С. 32-43.
19. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР – М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
20. *Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М.* Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / Справочник. – М.: Машиностроение. – 1983. – 352 с.

Поступила в редакцию 08.02.2016 г.

Авторы

Соболев Артём Владимирович, ст. преподаватель каф. РКР АЭС

E-mail: Sobolev_Artem@mail.ru

Радченко Михаил Владимирович, генеральный директор АО «Инженерный центр ядерных контейнеров»

E-mail: mvr@nuclearcask.ru

USING JOHNSON-COOK PLASTICITY MODEL TO DROP TEST NUMERICAL SIMULATION CONTAINERS FOR SPENT FUEL TRANSPORTATION

Sobolev A.V.^{*_**}, Radchenko M.V.^{**}

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI».

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

** JSC «Engineering Center of Nuclear Containers»

1, build.1 Marshal Biryuzov st., Moscow, 123298 Russia

ABSTRACT

The article presents results of pin drop test numerical simulation to containers for spent fuel transportation TUK-128. This situation applies to design basis accident during transportation of spent nuclear fuel by road outside a hazardous manufacture (outside nuclear power plant site or processing plant).

Deformation calculation and numerical simulation at failing container for transportation of SNF on the pin from height of 1 meter runs in elastoplastic field of work construction materials. It is important that there are many of options for setting construction materials plastic properties. In this the simulation results depend significantly on the choice of way to giving plastic properties.

The most common approach taking into account plasticity is the set tabulated function gives relationship between stresses and plastic deformations. This plasticity description does not account for not only temperature dependence plasticity but also kinematic hardening (the dependence elastic limit of deformation intensity). Using this plasticity model gives significant reduction to computational complexity, that especially important if required dozen of cases computational analysis.

Another, a more adequate approach to define plasticity is to take into account dependence of yield stress not only on the strain and its intensity, but also on the temperature (model plasticity Johnson-Cook). In this case, for each type of structural material needed to determine 5-7 parameters. Currently, there is no unequivocal method for determining this parameters, so the article provides method for their calculation. The disadvantage of Johnson-Cook plasticity model is a significant increase in computational complexity. For this reason, the present work provides comparative analysis of calculation results with define plasticity by Johnson-Cook model and tabulated functions.

Modelling is carried out for the two calculation cases: fall at the hull cover (made of stainless steel); falling on the hull bottom (made of ductile cast iron). Considered variants to take into account construction materials plastic properties compared with the results of drop tests to containers TUK-128.

Impact modeling performed by finite element method with using LS-DYNA program.

Key words: SNF container, drop to pin, Johnson-Cook plasticity model, Johnson-Cook plasticity model parameters calculation.

REFERENCES

1. Droste B. Testing of type B packages in Germany to environments beyond regulatory test standards. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. 2007, v. 18, no. 2, pp. 73-85.
2. Musolff A., Quercetti T., Müller K., Droste B., Komann S. Drop test program with the half-scale model CASTOR HAW/TB2. PATRAM 2010.
3. Borovkov A.I., Grunin V.V., Lutman Yu.L. Issledovaniya vertikal'nogo padeniya kontejnera

s otrabotavshym yadernym toplivom [Study of vertical drop container of spent nuclear fuel]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2013, no. 1, pp. 210-214 (in Russian).

4. International Atomic Energy Agency Safety Requirements. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, No. TS-R-1, 2005. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2009 (in Russian).

5. Jaksic N., Nilsson K.-F. Finite element modelling of the one meter drop test on a steel bar for the CASTOR cask. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, v. 239, no. 2, pp. 201-213.

6. Nevskiy S.A., Sarychev V.D., Komissarova I.A., Gromov V.E. Poly-phase model of plastic deformation of metals. *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Ser.: Estestvennye i tehnicheckie nauki*. 2013, v. 18, iss. 4, pp. 1848-1849 (in Russian).

7. Kolmogorov V.L. Deformacii. Napryazheniya. Razrushenie [Strain. Stress. Damage]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1970. 229 p. (in Russian).

8. Masterov V.A. Berkovsky V.S. Teoriya plasticheskoy deformacii i obrabotka metallov davleniem [Theory of plastic deformation and presser metal forming]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1989. 400 p. (in Russian).

9. Kudinov V.A. Predelnie plasticheskie deformacii metallov [Limits the plastic deformation of metals]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1989. 176 p. (in Russian).

10. Rybin V.V. Bol'shie plasticheskie deformacii i razrushenie metallov [Large plastic deformation and fracture of metals]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1986. 224 p. (in Russian).

11. Bogatov A.A., Mizhirickij O.I., Smirnov S.V. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem [Resource plasticity metals by pressure treatment]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1984. 144 p. (in Russian).

12. Unksov E.P. Teoriya plasticheskikh deformacij metallov [Theory plastic deformation of metals]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1983. 598 p. (in Russian).

13. Ivanov K.M., Lyasnikov A.V., Novikov L.A., Yurgenson E.E. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki davleniem [Mathematical modeling forming processes]. – St. Petersburg: Inventeks Publ., 1997. 268 p. (in Russian).

14. Botkin A.V. Nauchno-metodicheskie osnovy proektirovaniya processov uglovogo pressovaniya. Doct. Diss. [Scientific-methodical bases to designing angular pressing process. Doct. Diss.]. Ufa, 2013. 282 p. (in Russian).

15. Qiao L., Zencker U., Musolf A., Komann S. Dynamic Finite Element Analyses of a Spent Fuel Transport and Storage Cask with Impact Limiters by 9 Meter Drop Tests. SIMULIA Customer Conference, 2011.

16. Schwer L. Optional Strain-Rate Forms for the Johnson-Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon0. VI-th European LS-DYNA Users' Conference, 2007.

17. Trana E., Zecheru T., Bugaru M., Chereches T. Johnson-Cook Constitutive Model for OL 37 Steel. VI-th WSEAS Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering. Venice, Italy, Nov 21-23, 2007, pp. 269-273.

18. Kuz'kin V.A., Mihalyuk D.S. Numerical modeling usage to identify parameters of Johnson-Cook model for high-speed aluminum deformation. *Vychislitej'naya mehanika sploshnyh sred*. 2010, v. 3, no. 1, pp. 32-43 (in Russian).

19. Equipment and pipelines strength analysis norms for nuclear power plants (PNAE G-7-002-86). Gosatomenergondzor SSSR. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989. 525 p. (in Russian)

20. Poluhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. Resistance to plastic deformation of metals and alloys. Handbook. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1983. 352 p. (in Russian).

Authors

Sobolev Artem Vladimirovich, Senior Lecturer of NPP Reactor Development & Design Department.

E-mail: Sobolev_Artem@mail.ru

Radchenko Mikhail Vladimirovich, General Manager of JSC «Engineering Center of Nuclear Containers».

E-mail: mvr@nuclearcask.ru