

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Э110 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 1273 К

**И.Н. Измалков, Л.П. Лошманов\*, А.В. Костюхина\***

*ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (ОАО «ВНИИНМ»)*

*\* Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*



Исследуется влияние температуры до 1273 К и скорости деформации в интервале  $2,4 \cdot 10^{-4}$  –  $2,4 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup> на механические свойства и деформационное поведение сплава Э110. В экспериментах использовались кольцевые образцы, изготовленные из оболочки твэла ВВЭР Ø9,1×7,73 мм. Получены зависимости характеристик прочности (условный предел текучести, предел прочности, истинное сопротивление разрыву) и пластичности (равномерное удлинение, относительное остаточное удлинение, относительное остаточное сужение) сплава Э110 от температуры и скорости деформации. Исследовано влияние параметров нагружения на напряжение течения сплава Э110, для чего были получены истинные диаграммы деформирования, определены степени деформационного и скоростного упрочнений.

**Ключевые слова:** сплав Э110, предел текучести, предел прочности, истинное сопротивление разрыву, равномерное удлинение, относительное остаточное удлинение, относительное остаточное сужение, деформационное упрочнение, чувствительность к скорости деформации, напряжение течения, скорость деформации, истинная деформация, температура.

**Key words:** E110 alloy, yield stress, ultimate stress, true stress at burst, uniform elongation, residual elongation, residual necking, deformation hardening, strain rate sensitivities, flow stress, strain rate, true stress, true strain, temperature.

### ВВЕДЕНИЕ

Сплав Э110 (Zr-1%Nb) является одним из основных конструкционных материалов АЗ реактора типа ВВЭР и используется для изготовления оболочек твэлов [1], так как обладает набором необходимых эксплуатационных свойств, а именно, низким сечением взаимодействия с тепловыми нейтронами, коррозионной стойкостью в стационарных режимах эксплуатации, механической прочностью и др. [2–4]. Работоспособность реактора и многие технико-экономические характеристики АЭС, а также его безопасность в условиях нормальной эксплуатации и при ее нарушениях в аварийных режимах в условиях сейсмических воздействий в значительной степени зависят от механических свойств сплава Э110. Интерес к данному сплаву объясняется тем, что оболочка твэла является одним из первых физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Тем более, что и сам твэл относится к первому (наиболее высокому) классу конструктивных элементов, влияющих на безопасность АЭС [5–7]. В связи с ограниченным числом публикаций по данной проблеме в работе изучалось влия-

ние температуры до 1273 К (в  $\alpha$ - и  $\beta$ -областях) и скорости деформации в интервале  $2,410^{-4} - 2,410^{-2} \text{ с}^{-1}$  на механические свойства и деформационное поведение сплава Э110.

Актуальность проведенных исследований обусловлена недостатком экспериментальных данных о механических свойствах и деформационном поведении сплава Э110 при значительном варьировании температур и скоростей испытаний, которые необходимы для расчетов НДС оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации, при сейсмических воздействиях, в авариях при обращении с ЯТ, а также в проектных авариях [16–21].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовались кольцевые образцы (испытания в тангенциальном направлении) высотой 2,7 мм, изготовленные из оболочки твэла  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм по методике [8]. Длина рабочей части кольцевого образца 7,9 мм обусловлена диаметрами оболочки и применяемых цилиндрических опор (4 мм) [9]. Растяжение кольцевых образцов осуществлялось при скоростях деформации  $2,410^{-4} - 2,410^{-2} \text{ с}^{-1}$  и температурах 293–1273 К. Испытания при температурах 293–673 К проведены на воздухе, а при более высоких температурах в вакууме  $10^{-4}$  мм рт.ст. Нагрев образца до температуры испытания происходил в течение 15-ти минут с последующей выдержкой 10 мин. Механические испытания при температурах до 673 К проведены на испытательной машине типа Instron, высокотемпературные – на испытательной машине 1246-2/23001.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1, 2 представлены экспериментальные данные о стандартных характеристиках прочности и пластичности сплава в зависимости от температуры ( $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $S_B$  – предел прочности;  $S_K$  – истинное сопротивление разрыву;  $\delta_p$  – равномерное удлинение;  $\delta$  – относительное остаточное удлинение;  $\psi$  – относительное остаточное сужение;  $T$  – температура).

Для каждой температуры испытания и скорости деформации были проведены эксперименты по исследованию зависимости напряжения течения от величины пластической деформации. В результате были получены диаграммы деформирования сплава Э110 в координатах истинное напряжение ( $\sigma$ ) – истинная деформация ( $\varepsilon$ ) [10], из которых следует, что до деформаций  $\sim 0,2$  деформационное упрочнение происходит по степенному закону. При температурах 293–623 К в области больших пластических деформаций ( $\varepsilon \geq 0,2$ ) скорость упрочнения возрастает и зависимость напряжения от деформации становится линейной. Деформация, начиная с которой проявляется данный эффект, практически не зависит от скорости, но увеличивается с ростом температуры. При температурах 673 К и выше деформационное упрочнение подчиняется степенному закону. Истинные диаграммы деформирования в области степенной зависимости напряжения течения от деформации были аппроксимированы уравнением [11]

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0 \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha} \cdot \varepsilon^m, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – константа;  $\alpha$  – степень скоростного упрочнения;  $m$  – степень деформационного упрочнения;  $\dot{\varepsilon}$  и  $\varepsilon$  – скорость и величина пластической деформации соответственно. Константа  $\alpha$  характеризует чувствительность напряжения течения к скорости деформации, а константа  $m$  – к величине пластической деформации. На рисунках 3, 4 приведены зависимости степеней деформационного и скоростного упрочнений от температуры испытания.

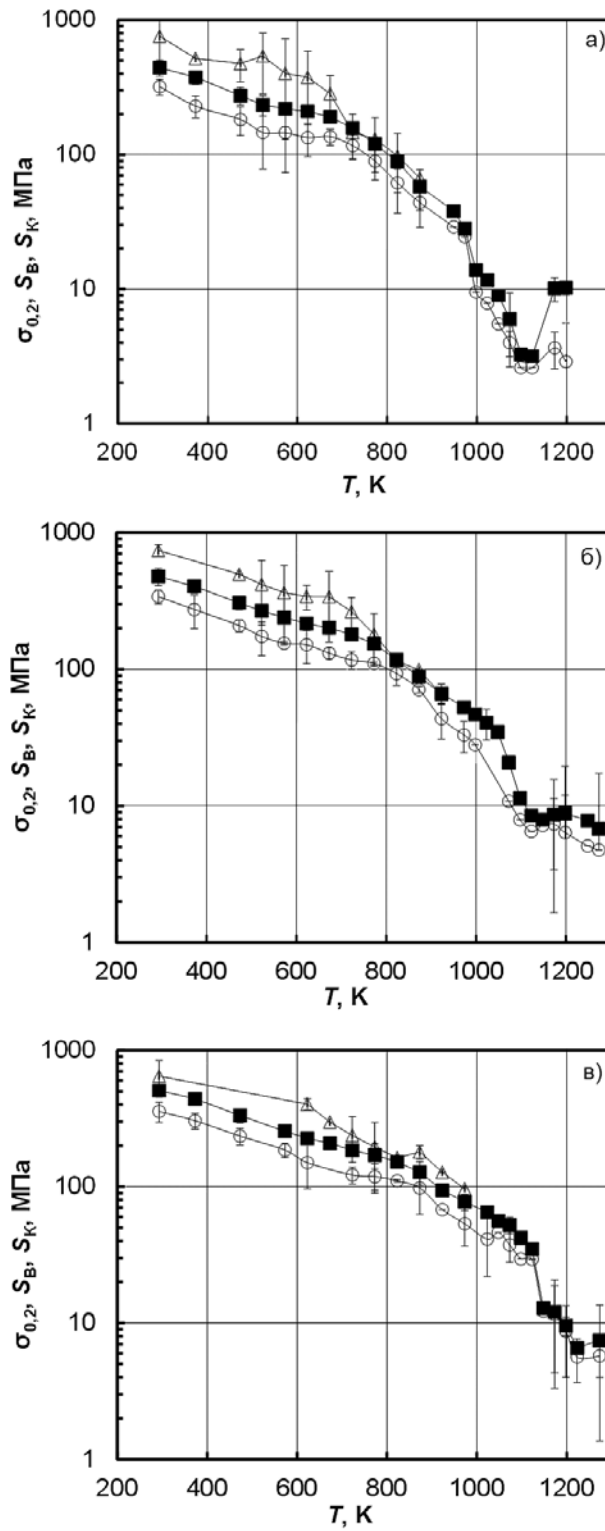


Рис. 1. Характеристики прочности: ○ –  $\sigma_{0.2}$ ; ■ –  $S_B$ ; △ –  $S_K$ ; а)  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ; б)  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ; в)  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$

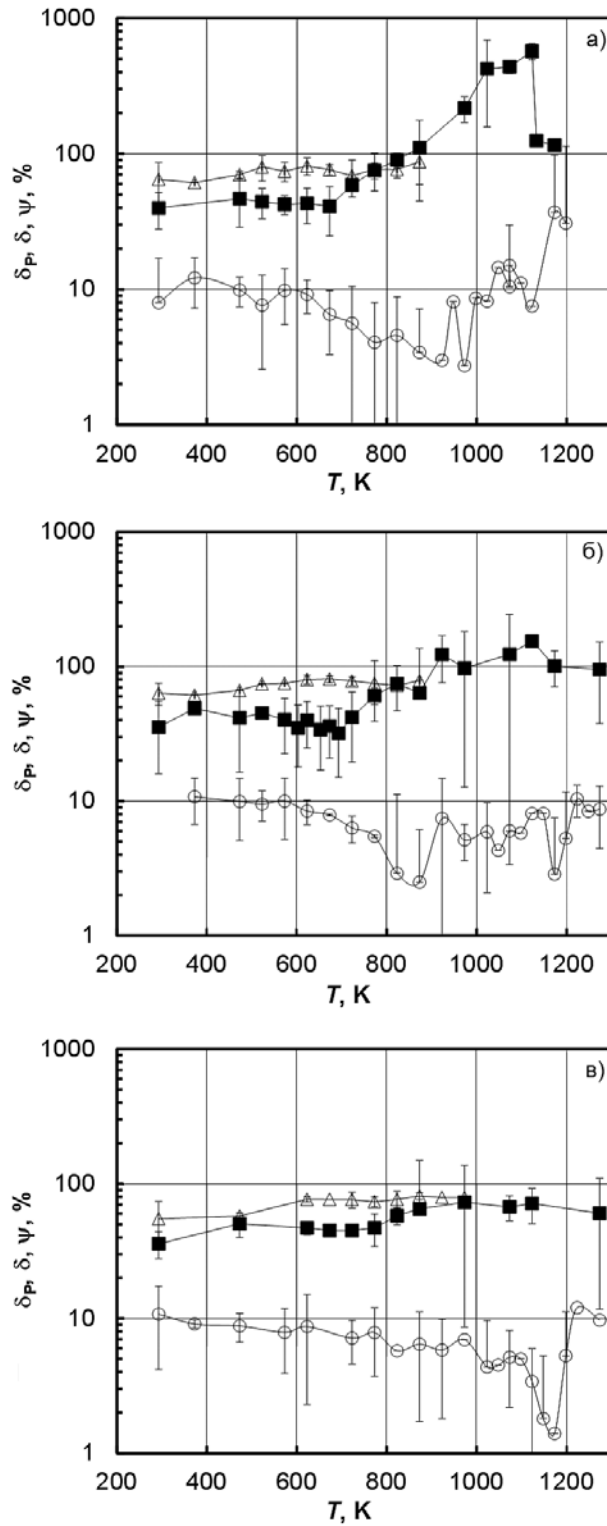


Рис. 2. Характеристики пластичности:  $\circ$  –  $\delta_p$ ;  $\blacksquare$  –  $\delta$ ;  $\triangle$  –  $\psi$ ; а)  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ; б)  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ; в)  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$

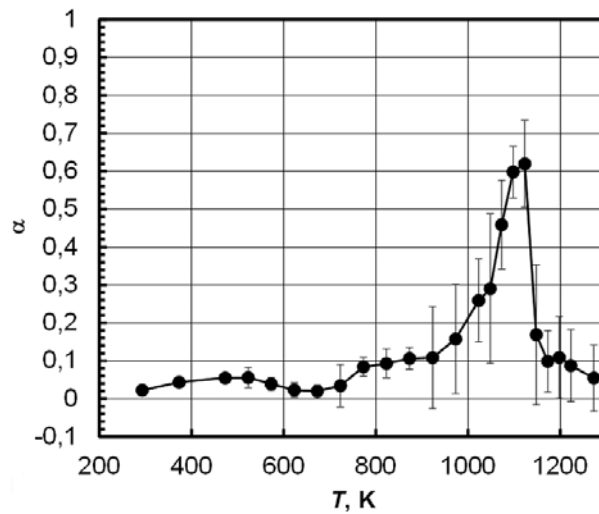


Рис. 3. Чувствительность к скорости деформации

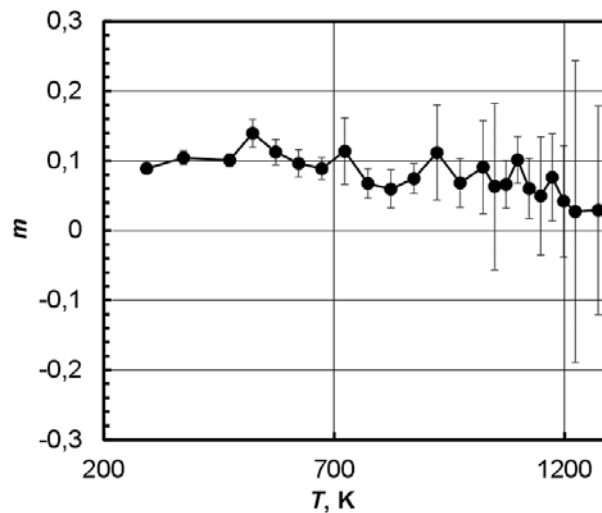


Рис. 4. Чувствительность к величине деформации

Анализ экспериментов приводит к следующим выводам.

1. При температурах 500–900 К наблюдается атермическая область на зависимостях характеристик прочности от температуры (рис.1а). При этом на зависимостях  $\delta(T)$  и  $\alpha(T)$  (рис.2, 3) наблюдаются локальные минимумы. Такое поведение обусловлено эффектом динамического деформационного старения (ДДС) [12], который вызван торможением движущихся дислокаций атмосферами подвижных атомов примесей внедрения (атмосферами Коттрелла), а также взаимодействием подвижных дислокаций с вакансионными скоплениями вокруг малоподвижных атомов примесей замещения [13]. Как видно, температурная область проявления ДДС смещается в сторону увеличения температуры с ростом скорости деформации (рис. 1), что согласуется с результатами [12–14]. Очевидно также, что эффект ДДС на сплаве Э110 «смазан», т.е. не такой четкий, как например, у сталей [13], поэтому оценить его энергию активации не представляется возможным.

2. В области температур 900–1200 К скорость снижения прочностных ха-

рактических с ростом температуры увеличивается (рис. 1), что обусловлено фазовым превращением [15].

3. В интервале температур 1100–1150 К на зависимостях предела текучести и предела прочности от температуры наблюдается локальный минимум (рис. 1а). В то же время величины относительного остаточного удлинения и чувствительности напряжения течения к скорости деформации достигают максимальных значений (рис. 2а, 3). Такое поведение характерно для эффекта сверхпластичности, обусловленного мелкозернистой структурой (формирующейся в результате полиморфного превращения) и комбинацией возврата и зернограницного проскальзывания [15]. При увеличении скорости деформации эффект резко снижается и практически исчезает при скорости деформации  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  (рис. 1, 2).

4. Вид зависимостей  $\psi(T)$  и  $m(T)$  (рис. 2, 4) не позволяет выделить на них какие либо особенные области, связанные с тем или иным микроскопическим процессом или механизмом деформирования.

5. При температурах более 900 К значения  $S_B$  и  $S_K$  практически совпадают (рис. 1) (выполняются условия  $\varepsilon = \text{const}$ ,  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ ), что позволяет говорить о наличии «установившейся ползучести». При меньших температурах деформирование происходит с упрочнением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены зависимости характеристик прочности (условный предел текучести, предел прочности, истинное сопротивление разрыву) и пластичности (равномерное удлинение, относительное остаточное удлинение, относительное остаточное сужение) сплава Э110 от температуры и скорости деформации. Исследовано влияние температурно-скоростных параметров нагружения на напряжение течения сплава Э110, для чего на основании истинных диаграмм деформирования определены степени деформационного и скоростного упрочнений. Эксперименты проведены в интервале температур от 293 К до 1273 К при скоростях деформации  $2,4 \cdot 10^{-4} - 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , всего получено более 780-ти точек на поверхности течения.

## Литература

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. Т. 1. 320 с.
2. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. Конструирование ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 400 с.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн.1 – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
4. Солонин М.И., Бибилашвили Ю.К., Никулина А.В. и др. Цирконий-ниобиевые сплавы для оболочек твэл и ТВС энергетических реакторов и установок типа ВВЭР и РБМК / Юбилейный сборник к 100-летию А.А. Бочвара. Избранные труды ВНИИНМ. 2002. Т. 1. С. 65–71.
5. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.
6. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Утверждены Постановлением Госатомнадзора РФ от 14.11.1997 № 9. Введены в действие с 01.07.1998.
7. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. Введены в действие с 01.07.2008. Отпечатано в НТЦЯРБ. 2007. 48 с.
8. Лошманов Л.П., Федотов П.В., Салатов А.В. и др. Образец для исследований деформационно-

го поведения материала оболочки твэла реактора типа ВВЭР в тангенциальном направлении. / Сб. науч. тр. Т. 8: Нетрадиционная энергетика. Ядерная энергетика. – М.: МИФИ. 2007. С. 141–143.

9. *Кобылянский Г.П., Новоселов А.Е.* Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе: справочные материалы по реакторному материаловедению. Под ред. В.А. Цыканова. – Димитровград.: ГНЦ РФ-НИИАР. 1996. 176 с.

10. *Федотов П.В., Лошманов Л.П., Костюхина А.В.* Деформирование сплава Э110 в  $\alpha$ -области // Деформация и разрушение материалов. – Москва, 2013, №2. С. 29–35.

11. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник. – М.: Металлургия. 1973. 224 с.

12. *Sun Ig Hong, Woo Ryu, Chang Saeng Rim.* Elongation minimum and strain rate sensitivity minimum of Zircaloy-4. // J. of Nuclear Materials V. 116. 1983. P. 314–316.

13. *Лошманов Л.П., Логинов А.В., Троценко А.Е. и др.* Динамическое деформационное старение сталей в широком диапазоне скоростей деформации // ФММ, 1989, т.68, вып.4. С. 636–639.

14. *Muung Ho Lee, Jun Hwan Kim, Byoung Kwon Choi, Yong Hwan Jeong* Mechanical properties and dynamic strain aging behavior of Zr-1.5Nb-0.4Sn-0.2Fe alloy. // J. of Alloys and Compounds. Vol. 428. 2007. P. 99–105.

15. *Дуглас Д.* Металловедение циркония. / Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР А. С. Займовского. – М.: Атомиздат, 1975, 360 с.

16. *Артюхина Л.Л., Алымов М.И., Пирогов Е.Н.* Сверхпластичность циркониевого сплава Н-1. / Сб. научных трудов «Расчеты и испытания на прочность материалов и элементов конструкций атомной техники». – М.: Энергоатомиздат. 1987. С. 52–56.

17. *Абрамов В.В., Пиминов В.А., Юременко В.П.* Подходы для определения деформаций транспортного технологического оборудования ТВС ВВЭР-1000 при аварийных ситуациях. / VI Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 2009. г. Подольск. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/f50.pdf> (дата обращения 18.09.2012).

18. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И.* Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. № 2. С. 33–43.

19. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Фоломеев В.И.* Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2002. №2. С. 44–53.

20. *Петкевич П.Г., Абрамов В.В., Юременко В.П. и др.* Верификация расчетных моделей LS-DYNA применительно к задачам анализа деформаций транспортно-технологического оборудования и ТВС // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2010. № 27. С. 86–99.

21. *Fedotov P. V., Goncharov A. A., Kumachev A. V. et al.* The RAPTA-5.2: Code for Modeling of VVER Type Fuel Rod Behavior under Design Basis Accidents Conditions International Atomic Energy Agency Technical Meeting on Fuel Behavior Under Transient and LOCA October 19–21, 2011, Ibaraki-ken Sangyo-kaikan, Mito city, Ibaraki, Japan.

22. *Khvostov G., Novikov V., Medvedev A., Bogatyr S.* Approaches to Modeling of High Burn-up Structure and Analysis of its Effects on the Behaviour of Light Water Reactor Fuels in the START-3 Fuel Performance Code. Proceedings of the Water Reactor Fuel Performance Meeting. October 2–6. Kyoto. 2005. p. 992–1008.

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

*Belozеров V.I., Shilina A.S., Ananieva O.A., Kunizina T.E., Gordienko A.B.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 illustrations. References, 10 titles.*

The paper presents the results of research on hydrogen generation in heterogeneous compositions containing aluminum, liquid sodium glass, crystalline sodium metasilicate and water of varying salinity. Found that silicon reagents remove the passivation oxide coating on the surface of aluminum and its translation into an activated state, effectively decompose water into hydrogen. Chemical decomposition into hydrogen efficiently are aqueous solutions with varying degrees of mineralization. The process of generating hydrogen is carried out at low temperatures and atmospheric pressure at high speed and theoretically limiting the release of hydrogen  $H_2$  0.12 kg / 1 kg of Al. The study of chemical processes of decomposition and removal of surface oxide films and the generation of hydrogen from restoration water by reactor metallic materials is one of the tasks of hydrogen safety for nuclear power plants.

#### **УДК 621.039.586.001.57**

*Application of computer codes RELAP\SCDAP and MELCOR for the analysis of management of WWER-1000 accidents \ Samokhin D.S., Chuklin A.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 10 pages, 4 tables, 5 illustrations. References, 7 titles.*

The article describes the problem of shortage of significant information about the processes occurring in a nuclear reactor during heavy failure, about parameters of these processes, and as consequence, absence of optimum actions for management of heavy failures. The article gives a description of power plants, performed with the code MELCOR. There is compares the results of calculations of WWER-1000 severe accidents generated by means computer codes MELCOR and RELAP/SCDAP.

#### **УДК 621.039.586: 536.42**

*About the Nature of the course of BN Reactor beyond Design Accidents under post-accident Core Materials Relocation \ Vlasichev G.N.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 7 pages, 3 illustrations. References, 22 titles.*

In the safety analysis of BN reactor accepted division of beyond design accident into four stages: initial, transitional, post-accident material relocation and post-accident heat removal. Formed in transitional stage as a result of the molten cladding relocation and solidification initial steel blockages of channels for a while impede the flow down of liquid fuel and form a solid foundation for the pool. To move the fuel in channels it is required at first a melting of blockages. After reactor shutdown it is possible in the case of insufficient heat to the surrounding fuel assemblies. Under melt-through of blockage the melt will be flow into the channels between the yet solid parts of the fuel rods at some length, it hardens there and again forms a layer of blockages. As a result, the process of heat-generating mass moving will be not smooth, and the intermittent nature and will consist of repeating phases: melt-through of blockages layer, leaking of melt at some length and solidification, the melting of the next layer, etc.

#### **УДК 620.172.251.222**

*Mechanical properties of E110 alloy at temperature range up to 1273K \ Izmalkov I.N., Loshmanov L.P., Kostyukhina A.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 7 pages, 4 illustrations. References, 22 titles.*

E110 alloy is one of the main structural materials of VVER type reactor core. The effect of temperature up to 1273 K and strain rate on the mechanical properties of the E110 alloy have been studied. The ring samples manufactured from VVER fuel rod cladding was tested. Tests have been conducted in the air and in a vacuum. As a result the strength and ductility properties of E110 alloy have been developed.

#### **УДК 621.039.54**

*Hybrid technique for shielding calculations on basis of CADIS \ Suslov I. R., Lyamcev I.A., Chernov S.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 3 tables, 3 illustrations. References, 20 titles.*

Presented a hybrid technique for shielding calculation that uses continuous energy Monte Carlo