

УДК 621.039.54: 539.3

DOI: 10.18698/0536-1044-2016-1-12-17

# Анализ релаксации контактной силы в соединении ТВЭЛа и дистанционирующей решетки тепловыделяющей сборки ВВЭР\*

М.П. Гусев, В.Л. Данилов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## The Analysis of Relaxation of the Contact Force Between the Fuel Rod and Spacer Grid in the Vver Fuel Assembly

M.P. Gusev, V.L. Danilov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: gusev.m.p@yandex.ru, vldanilov@mail.ru

**i** Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) и дистанционирующие решетки (ДР) составляют жесткий каркас тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора ВВЭР. Жесткость ТВС обеспечивается сваркой ДР и направляющих каналов, а также за счет ТВЭЛов, установленных с натягом в пуклевках ДР. В процессе эксплуатации жесткость конструкции ТВС снижается и происходит ее искривление, негативно влияющее на работу активной зоны реактора. Основной причиной деформации ТВС являются релаксационные процессы между ТВЭЛами и пуклевками ДР: со временем уменьшаются контактные силы, действующие между ними. В настоящее время процесс релаксации контактного взаимодействия между ТВЭЛом и пуклевкой ДР при реальных эксплуатационных нагрузках изучен недостаточно. Проведены исследования процесса релаксации контактного взаимодействия в зависимости от высокой температуры, нейтронного облучения, осевой силы, действующей на ТВЭЛы, и трения между ТВЭЛами и пуклевками ДР. Полученные результаты вносят существенный вклад в исследование процессов деформирования ТВС и активной зоны реактора в целом.

**Ключевые слова:** ТВЭЛ, дистанционирующая решетка, релаксация контактного взаимодействия, ТВС, нейтронное облучение.

**i** Fuel rods and spacer grids form a rigid frame of the VVER fuel assembly (FA). The FA stiffness is ensured by welding quality of the spacer grid and the guide tubes, as well as tight fitting of the fuel rods in the spacer grids. During the operation, the stiffness of the fuel assembly decreases, and its structure becomes distorted. This has a negative effect on the operation of the nuclear core. The main reason for the distortion is the relaxation processes between the fuel rods and the spacer grids as the contact forces between them decrease over time. Currently, the relaxation process of the contact interaction between the fuel rod and the spacer grid under real operational loadings is not sufficiently studied. The present work researches the relaxation process of the contact interaction depending on high temperature, neutron irradiation, axial force acting upon the fuel rods, and friction between the fuel rods and the spacer grids. The results obtained make a significant contribution to the study of deformation processes in the fuel assemblies and the nuclear core as a whole.

**Keywords:** fuel rod, spacer grid, relaxation of contact interaction, fuel assembly, neutron irradiation.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-3170814\_мол\_а.

В качестве объекта исследований был выбран тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), запрессованный в пуклевку дистанционирующей решетки (ДР). ТВЭЛы, ДР и направляющие каналы составляют жесткий каркас тепловыделяющей сборки (ТВС). В процессе эксплуатации жесткость конструкции ТВС снижается и сборка деформируется, что происходит вследствие действия эксплуатационных факторов, основным из которых является релаксация контактного взаимодействия между ТВЭЛами и пуклевками ДР. Интенсивность такой релаксации — снижение контактной силы между ТВЭЛом и пуклевкой ДР во времени — зависит от эксплуатационных нагрузок: высокой температуры, нейтронного облучения и осевой силы, действующей на ТВЭЛы со стороны пружинного блока ТВС. Влияние высокой температуры на релаксацию контактного взаимодействия было рассмотрено в работе [1], однако исследование других эксплуатационных факторов на этот процесс в научной литературе не встречается.

В настоящей статье приведены результаты исследований релаксации контактного взаимодействия между ТВЭЛом и пуклевкой ДР с использованием различных зависимостей для соотношения закона ползучести, а также дана оценка влияния осевой силы и трения на процесс релаксации.

Расчетные исследования релаксации контактного взаимодействия проводились в конечно-элементном комплексе Ansys 12, а обработка результатов — в математическом про-

граммном пакете MATLAB. Конечно-элементная модель соединения ТВЭЛа и пуклевки ДР приведена на рис. 1.

**Метод расчетного исследования.** Для решения задачи релаксации контактного взаимодействия был применен метод конечных элементов [1, 2]. Задача релаксации включает в себя определение деформаций ползучести и решение контактной задачи. При определенной подготовке конечно-элементной модели (см. рис. 1) программный комплекс Ansys 12 позволяет решить эти задачи совместно.

При решении задач, связанных с ползучестью, важным является соотношение связи между интенсивностью скорости деформаций ползучести, напряжением, температурой и нейтронным облучением. При термоч прочностных расчетах элементов ТВС чаще всего используется соотношение связи в форме Нортона:

$$\xi_e = A \varphi \exp\left(-\frac{Q}{T}\right) \sigma_e, \quad (1)$$

где  $\xi_e$  — интенсивность скорости деформаций ползучести, 1/ч;  $A$  — коэффициент,  $\text{м}^2\text{с}/(\text{Па}\cdot\text{ч})$ ;  $\varphi$  — плотность потока нейтронов,  $\text{н}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;  $Q$  — константа, К;  $T$  — температура, К;  $\sigma_e$  — интенсивность напряжений, Па.

Для определения значений констант  $A$  и  $Q$  был проведен анализ трех работ [3–5], в результате которого было выявлено их различие. В работах [3] и [4] значение константы  $A$  составило соответственно  $6,5\cdot 10^{-32}$  и  $2,9\cdot 10^{-27}$   $\text{м}^2\text{с}/(\text{Па}\cdot\text{ч})$ , а константы  $Q$  —  $6,0\cdot 10^3$  и  $1,3\cdot 10^4$  К.

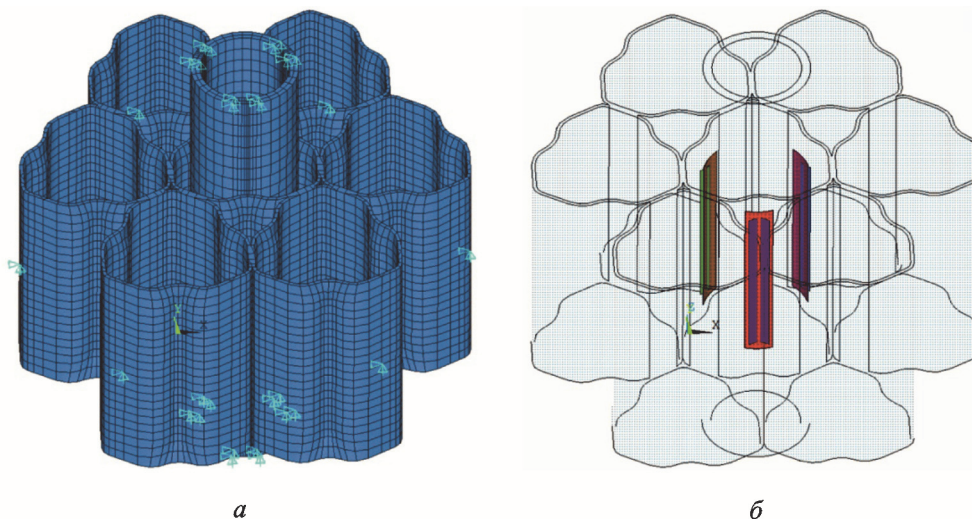


Рис. 1. Соединение ТВЭЛа и пуклевки ДР:  
 а — конечно-элементная модель; б — контактные области между ТВЭЛом и пуклевкой ДР

Значение плотности нейтронов  $\varphi = 1,73 \cdot 10^{18} \text{ н}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  было взято из работы [4].

Константы в работе [5] были приведены для выражения закона ползучести, незначительно отличающегося от соотношения (1):

$$\xi_e = BK\sigma_e, \quad (2)$$

где  $B = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$  — константа,  $1/(\text{сна} \cdot \text{Па})$ ;  $K = (4,0 - 4,7) \cdot 10^{-4}$  — скорость радиационного повреждения,  $\text{сна}/\text{ч}$ .

Выражение (2) является частным случаем соотношения (1) и не включает в себя зависимость ползучести от температуры. Кроме того, в нем используется другая мера интенсивности нейтронного облучения — смещения на атом (сна) в единицу времени (ч).

**Результаты исследований.** На рис. 2 приведены результаты расчетов релаксации контактной силы между ТВЭЛом и пуклевкой ДР в зависимости от времени при использовании констант из работ [3–5].

Как видно из рис. 2, расчетные значения релаксации контактной силы значительно отличаются друг от друга при использовании различных констант. Расчет с константами из работ [4], [5] и [3] показал соответственно заниженное, завышенное и среднее значение релаксации, т. е. она происходила соответственно с низкой, высокой и средней скоростью.

Из графика на рис. 2 можно определить важную характеристику — *время полной релаксации контактной силы* — момент времени, в который сила трения между ТВЭЛом и пуклевкой ДР становится равной осевой силе, действующей на ТВЭЛ, и может произойти его проскальзывание

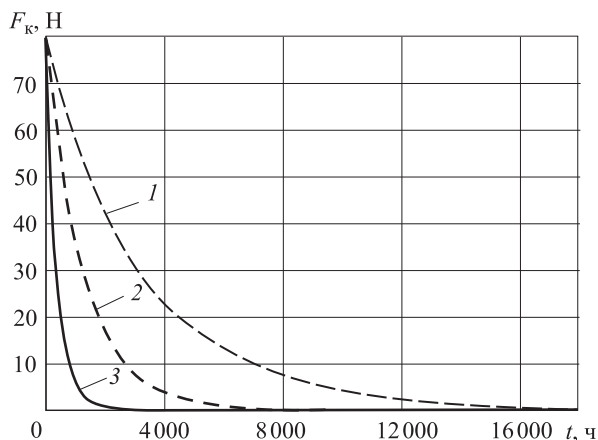


Рис. 2. Релаксация контактной силы  $F_k$  в зависимости от времени  $t$  при использовании в расчете констант из работы [3] (1), [4] (2) и [5] (3)

в пуклевке ДР. Осевые силы, действующие на ТВЭЛы, возникают вследствие поджатия ТВС пружинным блоком. Величина осей силы, действующей на ТВС, в соответствии с работой [4] составляет 6–8 кН. При предположении о равномерности распределения общей осевой силы и с учетом того, что в сборке расположено 312 ТВЭЛов, осевая сила, действующая на каждый из них, составит 19–26 Н. По длине сборки расположено 15 ДР, поэтому на каждый уровень взаимодействия ТВЭЛов с пуклевками ДР приходится 1,27–1,73 Н.

В соответствии с этим на рис. 3 приведены зависимости времени полной релаксации контактной силы между ТВЭЛом и упругим элементом ДР от осевой силы, действующей на ТВЭЛ, в пределах от 0 до 10 Н. Точки на рис. 3 обозначают расчетные данные, кривые линии — интерполяционные.

Зависимости, приведенные на рис. 3, были получены следующим образом. В каждый момент времени контактная сила релаксации  $F_c$  пересчитывалась в силу трения  $F_{fr}$  по стандартной формуле [6]:

$$F_{fr} = 3\mu F_c, \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения между ТВЭЛом и пуклевкой ДР.

Присутствие множителя 3 в выражении (3) объясняется наличием трех контактных областей между ТВЭЛом и пуклевкой ДР (см. рис. 1).

После определения  $F_{fr}$  в каждый момент времени ее величина сравнивалась со значением осевой силой  $F_{ax}$ , действующей на ТВЭЛ, и определялся момент времени, при котором

$$F_{fr} = F_{ax}. \quad (4)$$

Формально, момент времени, при котором

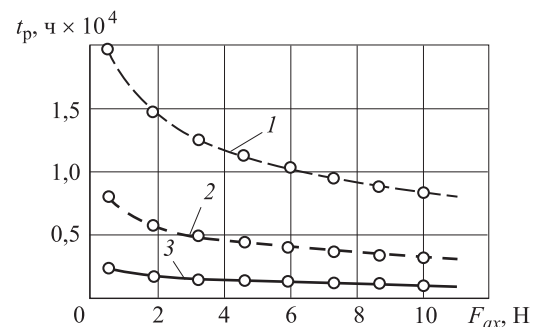


Рис. 3. Зависимости времени полной релаксации  $t_p$  от осевой силы  $F_{ax}$ , полученные при использовании в расчете констант из работы [3] (1), [4] (2) и [5] (3)

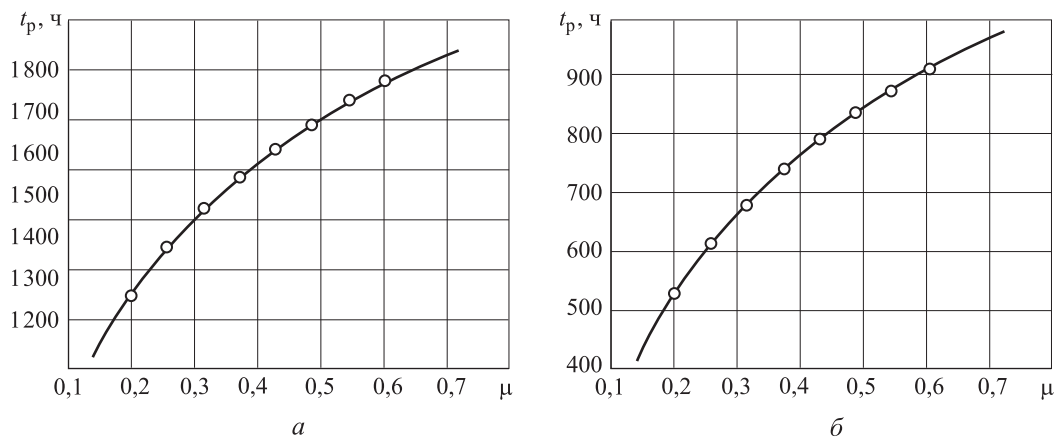


Рис. 4. Зависимости времени полной релаксации контактной силы  $t_p$  от коэффициента трения  $\mu$  при осевой силе  $F_{ax} = 1$  (а) и 10 Н (б)

выполняется выражение (4), является временем полной релаксации контактной силы.

Значение коэффициента трения  $\mu$  задавалось равным 0,5 в соответствии с работой [7], в которой показано, что его значения варьируются в диапазоне от 0,2 до 0,6.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, свидетельствует о значительном влиянии осевой силы на время полной релаксации: при увеличении первой второе снижается. Время полной релаксации контактной силы при расчете с константами из работы [4] составило  $1,9\text{--}1,5 \cdot 10^4$  ч при осевой силе, равной 0,8–1,8 Н. Это сопоставимо с длительностью топливной кампании  $1,8 \cdot 10^4$  ч, т. е. проскальзывание ТВЭЛа в пуклевке ДР произойдет в конце кампании. Заниженное значение времени полной релаксации показал расчет с константами из работы [5]. При том же значении осевой силы время полной релаксации составило  $0,3\text{--}0,2 \cdot 10^4$  ч, т. е. проскальзывание ТВЭЛа в пуклевке ДР произойдет в течение топливной кампании. Расчет с константами из работы [3] показал среднее значение времени полной релаксации  $0,8\text{--}0,6 \cdot 10^4$  ч.

На рис. 4 приведены зависимости времени полной релаксации контактной силы между ТВЭЛом и пуклевкой ДР от коэффициента трения, варьируемого в диапазоне 0,2–0,6 [7, 8], при различных значениях осевой силы, действующей на ТВЭЛ.

Как видно из рис. 4, коэффициент трения оказывает значительное влияние на время пол-

ной релаксации контактной силы: при увеличении первого вторая также возрастает, что согласуется с физикой взаимодействия ТВЭЛа и пуклевки ДР. Очевидно, что при осевой силе 10 Н время полной релаксации меньше, чем при силе 1 Н.

## Выводы

1. Расчеты релаксации контактной силы и времени полной релаксации, проведенные с константами из работ [3–5], значительно различаются, что свидетельствует о необходимости уточнения констант.

2. Осевые силы, действующие на ТВЭЛы от пружинного блока ТВС, оказывают значительное влияние на время полной релаксации контактной силы. При их увеличении время снижается. Таким образом, при неравномерном распределении осевой силы по ТВЭЛам полная релаксация контактной силы во всех ТВЭЛх сборки произойдет не одновременно, а через 2 000–16 000 ч после начала эксплуатации ТВС, при расчете с константами из работ [3–5]. Следовательно, жесткость конструкции ТВС будет плавно снижаться по мере проскальзывания ТВЭЛов.

3. Коэффициент трения между ТВЭЛом и пуклевкой ДР также оказывает существенное влияние на время полной релаксации контактной силы. При его увеличении время возрастает, что согласуется с физикой взаимодействия контактирующих тел.

## Литература

- [1] Гусев М.П., Данилов В.Л., Яковлев В.Ю. Определение времени полной релаксации контактного взаимодействия между оболочкой ТВЭЛа и упругим элементом дистанционирующей решетки в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 61–70.
- [2] Зинкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва, Мир, 1975. 343 с.
- [3] Пузанов Д.Н., Сатин А.А. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов. *Научно-техническая конференция молодых специалистов: Материалы конференции ОКБ «Гидропресс», 16–17 марта 2011*. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (дата обращения 20.05.2014).
- [4] Троянов В.М. *Расчетно-экспериментальное обоснование термомеханики активных зон реакторов типа ВВЭР*. Дис. ... д-ра тех. наук. Обнинск, 2003. 237 с.
- [5] Рогозянов А.Я. *Закономерности и модели многокомпонентной термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб из циркониевых сплавов*. Дис. ... д-ра тех. наук. Димитровград, 2001. 294 с.
- [6] Wang Z.G., Yoshikawa Y., Suzuki T., Osakada K. Determination of friction law in dry metal forming with DLC coated tool. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 277–280.
- [7] Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В., Пучков М.В., Дроздов Ю.Н., Пучков В.Н. Исследование влияние процессов трения и износа на работоспособность тепловыделяющих сборок водородных энергетических реакторов. *7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*, ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2011.
- [8] Danilov V.L., Dobrov M.V., Semishkin V.P., Vasilchenko I.N. Analysis of Dismantling Possibility and Unloading Efforts of Fuel Assemblies from Core of WWER. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference WWER FUEL Performance, Modelling and Experiment Support, 19–23 September 2005*, Albena, Bulgaria, pp. 319–327.

## References

- [1] Gusev M.P., Danilov V.L., Iakovlev V.Iu. Opredelenie vremeni polnoi relaksatsii kontaktnogo vzaimodeistviia mezhdou obolochkoi tvela i uprugim elementom distantsioniruiushchei reshetki v teplovydeliaiushchei sborke reaktora VVER [Determining time of the complete relaxation of contact interaction between the fuel clad and the elastic spacer grid cell in WWER fuel assembly]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2015, no. 5, pp. 61–70.
- [2] Zinkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in the art]. Moscow, Mir publ., 1975. 343 p.
- [3] Puzanov D.N., Satin A.A. Analiz i obobshchenie dannykh po svoistvam tsirkonievyykh splavov, primenaiushchikhsia v kachestve konstruksionnykh materialov [Analysis and generalization of data on the properties of zirconium alloys are used as structural materials]. *Nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia molodykh spetsialistov: Materialy konferentsii OKB «Gidropress», 16–17 marta 2011* [Scientific and technical conference of young specialists: Conference OKB «Hydraulic», 16–17 March 2011]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (accessed 20 May 2014).
- [4] Troianov V.M. *Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie termomekhaniki aktivnykh zon reaktorov tipa VVER*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Calculation-experimental study thermo mechanics cores of WWER. Dr. tech. sci. diss.]. Obninsk, 2003. 237 p.
- [5] Rogozianov A.Ia. *Zakonomernosti i modeli mnogokomponentnoi termicheskoi i radiatsionno-termicheskoi polzuchesti obolochechnykh trub iz tsirkonievyykh splavov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Patterns and models of multi-component thermal and radiation-thermal creep of the cladding tubes of zirconium alloys. Dr. tech. sci. diss.]. Dimitrovgrad, 2001. 294 p.



- [6] Wang Z.G., Yoshikawa Y., Suzuki T., Osakada K. Determination of friction law in dry metal forming with DLC coated tool. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 277–280.
- [7] Makarov V.V., Afanas'ev A.V., Matvienko I.V., Puchkov M.V., Drozdov Iu.N., Puchkov V.N. Issledovanie vliianie protsessov treniia i iznosa na rabotosposobnost' teploydeliaiushchikh sborok vodovodnianykh energeticheskikh reaktorov [Study the effect of friction and wear processes on the performance of fuel assemblies WWER power reactors]. *7-ia MNTK «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER» [7<sup>th</sup> IRTC «Ensuring the safety of nuclear power plants with WWER »]*. Podol'sk, OKB «Gidropress», 2011.
- [8] Danilov V.L., Dobrov M.V., Semishkin V.P., Vasilchenko I.N. Analysis of Dismantling Possibility and Unloading Efforts of Fuel Assemblies from Core of WWER. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference WWER FUEL Performance, Modelling and Experiment Support, 19-23 September 2005*, Albena, Bulgaria, pp. 319–327.

Статья поступила в редакцию 30.10.2015

## Информация об авторах

**ГУСЕВ Михаил Павлович** (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**ДАНИЛОВ Владимир Львович** (Москва) — профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vldanilov@mail.ru).

## Information about the authors

**GUSEV Mikhail Pavlovich** (Moscow) — Postgraduate, Applied Mechanics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**DANILOV Vladimir Lvovich** (Moscow) — Professor, Applied Mechanics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vldanilov@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
**М.А. Шолохова**

### «Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке»

Применение новых видов материалов и технологий в сварочном производстве приводит к повышению требований к качеству сварных конструкций, что, в свою очередь, требует использования новых, более прогрессивных видов сварочного оборудования и систем контроля, обеспечивающих заданные свойства готовой продукции.

Приведены новейшие достижения в разработке систем слежения при сварке, классификация систем слежения, принципы их работы, область применения.

Издание предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся созданием сварочных технологий, комплексов и оборудования, а также может быть использовано в качестве справочного пособия для подготовки специалистов по сварке.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru