

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕАКТОРНОЙ СТАЛИ 08X16H11M3-ПД В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.С. Демидов¹, В.В. Кашелкин², А.Д. Каштанов³, В.А. Яковлев³

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация
e-mail: demidov@mail.ru

²ОАО “Красная Звезда”, Москва, Российская Федерация
e-mail: re.entry@relcom.ru

³ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Методика прогнозирования в основном опирается на работы С.А. Шестерикова. Постоянные, входящие в базовые уравнения, определены по результатам испытаний на ползучесть при трех уровнях напряжений. Приведены экспериментальные данные, полученные при испытаниях стали 08X16H11M3-ПД на ползучесть и длительную прочность при 600 °С и 650 °С. На основе этих данных вычислены среднее теоретическое значение предела кратковременной прочности и другие коэффициенты базовых уравнений. В указанном интервале температур для прогнозирования длительной прочности стали с учетом ее радиационного облучения использовано предположение о равенстве отношения деформации разрушения по диаграмме растяжения к деформации разрушения при ползучести для близких по составу сталей AISI 316 и 08X16H11M3-ПД. Выявлено, что радиационное облучение приводит к существенному снижению предела длительной прочности.

Ключевые слова: длительная прочность, ползучесть, прогнозирование, облучение, деформация, стали 08X16H11M3-ПД и AISI 316.

FORECAST OF REACTOR STEEL 08X16H11M3-ПД MECHANICAL PROPERTIES UNDER CREEP CONDITIONS WITH REGARD FOR IRRADIATION AND WITHOUT IRRADIATION

A.S. Demidov¹, V.V. Kashelkin², A.D. Kashtanov³, V.A. Yakovlev³

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
e-mail: demidov@mail.ru

²JSC “Krasnaya Zvezda”, Moscow, Russian Federation
e-mail: re.entry@relcom.ru

³Research Institute “Prometey”, St.-Petersburg, Russian Federation

Forecasting technique relies heavily on the works of S.A. Shesterikov with employees. The constants in the basic equations are determined by creep test results at three levels of stress. Experimental data obtained by the creep and long-term strength tests of steel 08X16H11M3-ПД at 600 °С and 650 °С are presented. Average theoretical value of the short-term strength limit and other factors of underlying equations are computed on the basis of these data. In this temperature range, a long-term strength of irradiated steel is evaluated. The assumption is used of the equality of the ratio of failure deformation on tensile diagram to failure deformation under creep for similar steels — AISI 316 and 08X16H11M3-ПД. Calculations show that the irradiation exposure significantly reduces the limit of long-term strength.

Keywords: long-term strength, creep, forecast, irradiation, strain, steel 08X16H11M3-ПД, steel AISI 316.

Космические ядерные энергоустановки (ЯЭУ) второго поколения отличаются повышенной мощностью и длительным ресурсом работы до 10–15 лет. Для надежной оценки ресурса элементов конструкции ЯЭУ расчеты на прочность требуется выполнять с учетом поведения конструкционных материалов при высоких температурах, для этого нужно располагать значениями параметров ползучести и длительной прочности.

Значения необходимых параметров получают в результате испытаний на ползучесть и длительную прочность стандартных образцов при постоянной нагрузке и температуре.

Спрогнозировать такие данные прямыми испытаниями на 10–15 лет очень сложно и практически невыполнимо. Поэтому в целях сокращения времени испытаний на длительную прочность прогноз выполняют путем экстраполяции результатов экспериментов при сравнительно кратковременных испытаниях.

В настоящее время предложено несколько эмпирических зависимостей для прогнозирования длительной прочности [1–8].

Разрабатываемый метод прогнозирования значений пределов длительной прочности без учета и с учетом радиационного облучения основан на работах С.А. Шестерикова. Этот метод позволяет при определении предела длительной прочности учесть также влияние ползучести материала, что проверено на большом числе экспериментальных данных [9–11].

Методика обработки экспериментальных данных основана на соотношении [9]

$$\lg t_p = D + 17 \lg \sigma_{\text{вг}} - n \lg \frac{\sigma}{\sigma_{\text{вг}} - \sigma}, \quad (1)$$

где t_p — время до разрушения; $\sigma_{\text{вг}}$ — условный (теоретический) предел кратковременной прочности; σ — прикладываемое напряжение при испытаниях; D и n — константы.

В определяющем соотношении (1) для экстраполяции значений пределов длительной прочности в качестве основного уравнения, описывающего процессы развития деформации ползучести, используется зависимость

$$\dot{\epsilon} = A \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{вг}} - \sigma} \right)^n, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ — установившаяся скорость ползучести; A — константа; $\sigma_{\text{вг}}$ и n — определены в соотношении (1).

Для определения постоянных $\sigma_{\text{вг}}$, n , A и D необходимы, как минимум, результаты испытаний на ползучесть до разрушения при трех уровнях напряжений.

Обработка экспериментальных данных может быть выполнена по следующему алгоритму [12].

После преобразований соотношения (2), получим равенство

$$\frac{\lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_j}\right) \lg\left(\frac{\sigma_j \sigma_{\text{ВТ}}^{ijk} - \sigma_k}{\sigma_k \sigma_{\text{ВТ}}^{ijk} - \sigma_j}\right)}{\lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_j}{\dot{\epsilon}_k}\right) \lg\left(\frac{\sigma_i \sigma_{\text{ВТ}}^{ijk} - \sigma_j}{\sigma_j \sigma_{\text{ВТ}}^{ijk} - \sigma_i}\right)} = 1, \quad (3)$$

где индексы i, j, k указывают номер эксперимента.

В результате решения трансцендентного уравнения (3) определяются $\sigma_{\text{ВТ}}^{ijk}$ по каждой комбинации данных результатов трех испытаний. Затем вычисляется среднее значение $\sigma_{\text{ВТ}}$.

Из соотношения

$$n_{ij} = \frac{\lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_j}\right)}{\lg\left(\frac{\sigma_i \sigma_{\text{ВТ}} - \sigma_j}{\sigma_j \sigma_{\text{ВТ}} - \sigma_i}\right)} \quad (4)$$

определяем значения n_{ij} по всем комбинациям $(\dot{\epsilon}_i, \sigma_i)$ и $(\dot{\epsilon}_j, \sigma_j)$, затем находим среднее значение n .

Полученные значения $\sigma_{\text{ВТ}}$ и n используются для вычисления D_i по формуле

$$D_i = \lg \left[t_{\text{Pi}} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{ВТ}} - \sigma_i} \right)^n \sigma_{\text{ВТ}}^{-17} \right], \quad (5)$$

а затем — для вычисления среднего значения D . Параметр A определяется из зависимости (2).

Приведенным алгоритмом обработаны результаты испытаний на ползучесть образцов стали марки 08X16H11M3-ПД при температуре 600 °С.

Образцы и порядок проведения испытаний соответствовали ГОСТ 3248–81 и ГОСТ 10145–81. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Для стали 08X16H11M3-ПД (при 600 °С) при обработке данных табл. 1 по формулам (2)–(5) получены следующие значения искомых параметров: $\sigma_{\text{ВТ}} = 273,4$ МПа, $n = 2,238$, $D = -36,957$, $A = 2,0725 \cdot 10^{-6}$.

Результаты испытаний на ползучесть образцов жаропрочной стали 08X16H11M3-ПД при температуре 650 °С приведены в табл. 2. Значения искомых параметров для стали 08X16H11M3-ПД при 650 °С получены при обработке данных табл. 2 по формулам (2)–(5): $\sigma_{\text{ВТ}} = 182,9$ МПа, $n = 1,754$, $D = -34,151$, $A = 6,025 \cdot 10^{-6}$.

Результаты испытаний образцов стали 08X16H11M3-ПД при 600 °С

Напряжение, МПа	Время до разрушения, ч	Установившаяся скорость ползучести, ч ⁻¹
250	458,3	$4,30 \cdot 10^{-4}$
250	178	$4,58 \cdot 10^{-4}$
200	1584	$1,12 \cdot 10^{-4}$
200	2716	$4,21 \cdot 10^{-5}$
180	5593	$2,90 \cdot 10^{-6}$
130	22809	$2,39 \cdot 10^{-6}$
130	40987	$1,12 \cdot 10^{-6}$
110	59195*	$8,61 \cdot 10^{-7}$
110	59535*	$6,79 \cdot 10^{-7}$

Пр и м е ч а н и е. *Испытания продолжаются.

Аналогичным образом определяются параметры $\sigma_{вг}$, n , D , A для той же стали при температуре 650 °С.

Результаты испытаний образцов стали 08X16H11M3-ПД при 650 °С

Напряжение, МПа	Время до разрушения, ч	Установившаяся скорость ползучести, ч ⁻¹
170	821	$1,61 \cdot 10^{-4}$
170	646	$1,41 \cdot 10^{-4}$
140	2687	$3,02 \cdot 10^{-5}$
140	1169	$8,74 \cdot 10^{-5}$
140	1727	$7,30 \cdot 10^{-5}$
150	528	$1,41 \cdot 10^{-4}$
150	1324	$4,10 \cdot 10^{-5}$
110	12840	$7,60 \cdot 10^{-6}$
110	7207	$2,24 \cdot 10^{-5}$
90	18902	$4,48 \cdot 10^{-6}$
90	20307	$6,64 \cdot 10^{-6}$

В результате для стали 08X16H11M3-ПД при 600 °С имеем:

$$\lg t_p = 4,4686 - 2,238 \lg \frac{\sigma}{273,4 - \sigma}, \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon} = 2,0725 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\sigma}{273,4 - \sigma} \right)^{2,238}, \quad (7)$$

При температуре 650 °С имеем

$$\lg t_p = 4,3066 - 1,754 \lg \frac{\sigma}{182,9 - \sigma}, \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon} = 6,025 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\sigma}{182,9 - \sigma} \right)^{1,754}, \quad (9)$$

Уравнения (6)–(9) определяют пределы длительной прочности и деформации разрушения при ползучести без учета радиационного облучения.

При температуре 600 °С деформация разрушения по диаграмме растяжения [1] равна $\delta_m = 30\%$, предел длительной прочности для 10^5 ч по (6) равен $\sigma_{10^5}^{600^\circ\text{C}} = 100,6$ МПа, деформация разрушения при ползучести по (7) равна $\delta_n = 6,12\%$. Отношение деформации δ_m к деформации δ_n равно $\eta_{600^\circ\text{C}} = \frac{30}{6,12} = 4,9$.

Нейтронное облучение оказывает отрицательное воздействие на работоспособность аустенитных сталей. Можно выделить два явления, вызванные нейтронным облучением, а именно: ускорение ползучести и охрупчивание [13]. При испытаниях стали AISI 316 (аналог стали 08X16H11M3-ПД) по данным [14–20] при температуре 600...650 °С и флюенсе порядка $10^{22} \dots 10^{23}$ н/см² можно принимать увеличение скорости ползучести в 2 раза, при этом соотношение (7) можно записать в виде

$$\dot{\varepsilon} = 4,145 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\sigma}{273,4 - \sigma} \right)^{2,238}. \quad (10)$$

По данным работы [4] для стали AISI 316 вследствие охрупчивания удлинение по диаграмме равняется 20%, сохранив в условиях облучения $\eta_{600^\circ\text{C}} = 4,9$, получим деформацию разрушения при ползучести $\delta = \frac{20}{4,9} = 4,08\%$. Этой деформации за время 10^5 ч соответствует скорость ползучести $\dot{\varepsilon} = 0,408 \cdot 10^{-6}$. Этой скорости по (10) соответствует предел длительной прочности с учетом облучения $\sigma_{10^5}^{600^\circ\text{C}} = 71,6$ МПа.

Аналогично определим предел длительной прочности для 10^5 ч для стали 08X16H11M3-ПД при 650 °С с учетом радиационного облучения.

При этой температуре деформация разрушения по диаграмме по данным ЦНИИ КМ “Прометей” составляет $\delta_m = 45,3\%$. Предел длительной прочности по (8) $\sigma_{10^5}^{650^\circ\text{C}} = 60,5$ МПа, деформация разрушения при ползучести по (9) равна 12,2%. Отношение деформации равно

$\eta_{650^{\circ}\text{C}} = \frac{45,3}{12,2} = 3,7$. Вследствие облучения скорость ползучести увеличивается в 2 раза и уравнение [9] принимает вид

$$\dot{\epsilon} = 12,05 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\sigma}{182,9 - \sigma} \right)^{1,754}. \quad (11)$$

Примем с учетом охрупчивания удлинение разрушения равным 20%. При сохранении значения отношения деформаций $\eta_{650^{\circ}\text{C}} = 3,7$ деформация разрушения при ползучести с учетом облучения равна $\delta_{\text{п}} = \frac{20}{3,7} = 5,4\%$. Деформации $\epsilon = 0,054$ за время 10^5 ч соответствует скорость ползучести $\dot{\epsilon} = 0,54 \cdot 10^{-6}$. Данной скорости по (11) соответствует предел длительной прочности с учетом облучения $\sigma_{10^5}^{650^{\circ}\text{C}} = 26,6$ МПа.

Выводы. 1. Предлагаемый метод прогнозирования длительной прочности реакторной стали 08X16H11M3-ПД с учетом ползучести основан на работах С.А. Шестерикова. Приведены данные по испытаниям стали при 600 и 650 °С и результаты прогнозирования.

2. Для прогнозирования длительной прочности указанной стали с учетом ее радиационного облучения использовано предположение о равенстве отношения деформации разрушения по диаграмме растяжения к деформации разрушения при ползучести для двух близких по составу аустенитных сталей — AISI 316 и 08X16H11M3-ПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госэнергоатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
2. ОСТ 108.901.102-78. Котлы, турбины и трубопроводы. Методы определения жаропрочности металлов.
3. Журков С.Н., Санфирова Т.П. Температурно-временная зависимость прочности чистых металлов // Доклады АН СССР. 1955. Т. 101.
4. Михайлов-Михеев П.Б. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. Л.: Красный печатник, 1961. 838 с.
5. Тайра С., Отани П. Теория высокотемпературной прочности материалов. М.: Металлургия, 1986. 280 с.
6. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. М.: Недра, 1996. 591 с.
7. Угорский А.Э. О параметрических методах температурно-временной экстраполяции предела длительной прочности // Проблемы прочности. 1986. № 1. С. 40-43.
8. Цивилиук И.С., Авраменко Д.С. Параметрические методы описания и экстраполяции характеристик длительной прочности тугоплавких материалов // Проблемы прочности. 1985. № 12. С. 59-63.
9. Шестериков С.А., Аршакуни А.Л., Чередеева Л.В. Метод температурно-силового прогнозирования длительной прочности металлов // Проблемы прочности. 1989. № 9. С. 6-9.

10. *Shesterikov S.A., Beliakova T.A., Voshedchenko B.M., Kashelkin V.V., Kuznetsova I.A. and Yakovlev V.A.* Long-Term Strength Prediction for Chromium-Nickel Austenitic Steels Based on Short-Term Experimental Results // *Materials Physics and Mechanics*. 2004. Vol. 7. No. 1. P. 72–78.
11. *Аршакуни А.Л., Шестериков С.А.* Прогнозирование длительной прочности жаропрочных металлических материалов // *МТТ*. 1994. № 3. С. 224–239.
12. *Демидов А.С., Кашелкин В.В.* Длительная прочность, остаточный ресурс и поврежденность конструктивных элементов двигательных и энергетических установок. М.: Изд-во МАИ, 2011. 158 с.
13. *Паршин А.М.* Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов. Челябинск: Металлургия, 1988. 665 с.
14. *Nuclear reactor materials*. 1970. Vol. 13. No. 1. 21 p.
15. *Horsten V.G., Devries M.G.* Effects of Radiation on Materials. 17th Inter. Symposium. STP 270. 1996. 1160 p.
16. *Wood D.S.* Overview of Programme in Mechanical Properties of Fast Reactor Structural Materials, Proc. I WGFR Specialists Meeting. Vienna, oct. 1983. P. 115–136.
17. *Lovell A.J.* *Nuclear Technology*. 1975. Vol. 26. P. 297–306.
18. *Lovell A.J., Holmes J.J.*, *Trans. Am. Nucl. Soc.* 1975. Vol. 15. P. 297–306.
19. *Nuclear reactor materials*. 1965. Vol. 8. No. 3. 26 p.
20. *Nuclear reactor materials*. 1969. Vol. 12. No. 1. 30 p.

REFERENCES

- [1] PNAE G-7-002–86. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Gosenergoatomnadzor SSSR [Structural design standards for equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 525 p.
- [2] OST 108.901.102–78. Kotly, turbiny i truboprovody. Metody opredeleniya zharoprochnosti metallov [Standard 108.901.102–78. Boilers, turbines and pipelines. Methods defining high-temperature strength of metals].
- [3] Zhurkov S.N., Sanfirova T.P. Temperature-time relationship for pure metals strength. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1955, vol. 101 (in Russ.).
- [4] Mikhaylov-Mikheev P.B. *Spravochnik po metallicheskim materialam turbino- i motostroeniya* [Reference book on metal materials for turbine and motor industries]. Leningrad, Krasnyy pechatnik Publ., 1961. 838 p.
- [5] Tayra S., Otani P. *Teoriya vysokotemperaturnoy prochnosti materialov* [Theory of high-temperature strength of materials]. placeCityMoscow, Metallurgiya Publ., 1986. 280 p.
- [6] Getsov L.B. *Materialy i prochnost' detaley gazovykh turbin* [Materials and strength of gas turbine components]. placeCityMoscow, Nedra Publ., 1996. 591 p.
- [7] Ugorskiy A.E. O parametricheskikh metodakh temperaturno-vremennoy ekstrapolyatsii predela dlitel'noy prochnosti [On parametric methods for temperature-time extrapolation of long-term strength]. *Problemy prochnosti* [J. Strength of Materials], 1986, no. 1, pp. 40–43 (in Russ.).
- [8] Tsvilyuk I.S., Avramenko D.S. Parametric methods describing and extrapolating characteristics of refractory materials long-term strength. *Problemy prochnosti* [J. Strength of Materials], 1985, no. 12, pp. 59–63 (in Russ.).
- [9] Shesterikov S.A., Arshakuni A.L., Cheredeeva L.V. Method of temperature-forced forecasting of metal long-term strength. *Problemy prochnosti* [J. Strength of Materials], 1989, no. 9, pp. 6–9 (in Russ.).

- [10] Shesterikov S.A., Beliakova T.A., Voshedchenko B.M., Kashelkin V.V., Kuznetsova I.A., Yakovlev V.A. Long-Term Strength Prediction for Chromium-Nickel Austenitic Steels Based on Short-Term Experimental Results. *Materials Physics and Mechanics*, 2004, vol. 7, no. 1, pp. 72–78.
- [11] Arshakuni A.L., Shesterikov S.A. Forecasting of long-term strength for heat-resistant metal materials. *Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela* [Mechanics of Solids], 1994, no. 3, pp. 224–239 (in Russ.).
- [12] Demidov A.S., Kashelkin V.V. Dlitel'naya prochnost', ostatochnyy resurs i povrezhdennost' konstruktivnykh elementov dvigatel'nykh i energeticheskikh ustanovok [Long-term strength, remaining lifetime, and defectness of structural members of power plants]. Moscow, MAI Publ., 2011. 158 p.
- [13] Parshin A.M. Struktura, prochnost' i radiatsionnaya povrezhdaemost' korrozionnostoykikh staley i splavov [Structure, strength and radiation damageability of corrosion-resistant steels and alloys]. Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1988. 665 p.
- [14] *Nuclear reactor materials*, 1970, vol. 13, no. 1. 21 p.
- [15] Horsten V.G., Devries M.G. Effects of Radiation on Materials. *17th Inter. Symposium STP 270*, 1996. 1160 p.
- [16] Wood D.S., Overview of Programme in Mechanical Properties of Fast Reactor Structural Materials, *Proc. I WGFR Speshialists Meeting*. Vienna, October 1983, pp. 115–136.
- [17] Lovell A.J. *Nuclear Technology*, 1975, vol. 26, pp. 297–306.
- [18] Lovell A.J., Holmes J.J., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 1975, vol. 15, pp. 297–306.
- [19] *Nuclear reactor materials*, 1965, vol. 8, no. 3. 26 p.
- [20] *Nuclear reactor materials*, 1969, vol. 12, no. 1. 30 p.

Статья поступила в редакцию 4.12.2013

Демидов Анатолий Семенович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов” Московского авиационного института. Автор 70 научных работ в области конструкции и прочности космических энергоустановок.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4.

Demidov A.S. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Construction and Design of Flying Vehicle Engines” department of the Moscow Aviation Institute (National Research University). Author of 70 publications in the field of space nuclear plants design and strength. Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe sh. 4, A-80, GSP-3, Moscow, 125993 Russian Federation.

Кашелкин Владимир Владимирович — д-р техн. наук, профессор, начальник отдела ОАО “Красная Звезда”. Автор более 80 научных работ в области прочности космических энергоустановок.

ОАО “Красная Звезда”, Российская Федерация, 115230, Москва, Электролитный пр-д, д. 1а.

Kashelkin V.V. — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of department of Joint Stock Company Ltd “Krasnaya Zvezda”. Author of more than 80 publications in the field of space nuclear plants strength.

Joint Stock Company Ltd “Krasnaya Zvezda”, Elektrolitnyy pr. 1a, Moscow, 115230 Russian Federation.

Каштанов Александр Дмитриевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории ЦНИИ КМ “Прометей”. Автор более 25 научных работ в области материаловедения. ЦНИИ КМ “Прометей”, Российская Федерация, 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

Kashtanov A.D. — Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory of the Federal State Unitary Establishment Central Science Investigation Institute of Structure Materials “Prometey”. Author of more than 25 publications in the field of materials structure investigations. Federal State Unitary Establishment Central Science Investigation Institute of Structure Materials “Prometey”, Shpalernaya ul. 49, St. Petersburg, 191015 Russian Federation.

Яковлев Виталий Аверкиевич — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ЦНИИ КМ “Прометей”. Автор более 80 научных работ в области материаловедения. ЦНИИ КМ “Прометей”, Российская Федерация, 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

Jakovlev V.A. — Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the Federal State Unitary Establishment Central Science Investigation Institute of Structure Materials “Prometey”. Author of more than 80 publications in the field of materials structure investigations. Federal State Unitary Establishment Central Science Investigation Institute of Structure Materials “Prometey”, Shpalernaya ul. 49, St. Petersburg, 191015 Russian Federation.