

УДК 621.7-97

Анализ релаксации винтовой пружины из нержавеющей стали 08X18H10 при высокой температуре

Сунь Х.^{1,*}, Данилов В. Л.¹

* sunjjust@126.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье установлены зависимости релаксации пружин, работающих при высокой температуре. Выполнено численное моделирование пружины с пятью витками в среде Abaqus. Проведены эксперименты релаксаций пружин при фиксированном значении степени сжатия при температуре 350°C. Приводится сравнительный анализ теоретического расчета сжимающих сил с результатами экспериментов. Результаты моделирования с использованием Abaqus хорошо совпадают с результатами экспериментов. Исследование показало возможность использования параметров уравнения ползучести, определенных на основе экспериментальных результатов при высоких температурах для прогнозирования ползучести и релаксации пружин, работающих при менее высоких температурах.

Ключевые слова: винтовая пружина, релаксация, ABAQUS, нержавеющая сталь, высокая температурная печь

Введение

Релаксация напряжений является распространенным явлением в деталях, работающих при высоких температурах. Во многих случаях процесс релаксации негативно влияет на работоспособность конструкции. В качестве одного из основных элементов, в частности, это актуально для винтовых цилиндрических пружин, используемых в ответственных конструкциях теплоэнергетического оборудования. Процесс релаксации проявляется в уменьшении силы упругого деформирования пружины с течением времени. Большинство исследований высокотемпературной релаксации пружин [1,2], осуществлены экспериментально с точки зрения состояния структуры металла и технологии изготовления пружин. Теоретические исследования и расчеты процессов ползучести и релаксации пружин представлены в меньшей степени.

Исследование релаксации напряжений в сечении витка пружины и прогноз срока обслуживания пружинных соединений имеют важное теоретическое и практическое значение [3,4]. На основе теории ползучести в статье исследуется закономерность

релаксации пружин численным методом анализа и результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

В статье представлены методика и результаты ускоренных испытаний на ползучесть и релаксацию винтовых цилиндрических пружин, а также численное моделирование в среде Abaqus при различных силовых и температурных воздействиях. Сопоставление результатов моделирования в среде Abaqus и результатов экспериментов позволяет выработать рекомендации по практическому использованию и проверить правильность расчетов, это возможно предоставлять основания для пружин в технических устройствах.

1. Уравнение состояния пружинной стали

Механизмом длительного деформирования стали при высоких температурах является ползучесть, одним из проявлений которой является релаксация напряжений при неизменной полной деформации.

Известно, что деформация ползучести материала может быть представлена в виде произведения функций от напряжения σ , времени t и температуры T [5]:

$$\varepsilon^c = f_1(\sigma)f_2(t)f_3(T). \quad (1)$$

Конкретную форму уравнения ползучести примем в виде

$$\dot{\varepsilon}^c = Ae^{-\frac{Q}{kT}}\sigma^n t^m, \quad (2)$$

где Q - энергия активации процесса ползучести; T - термодинамическая температура; k - постоянная Больцмана; A, m, n - параметры материала, определяемые экспериментально.

Значения параметров состояния определялись обработкой результатов испытаний на релаксацию образцов пружин при разной величине предварительного сжатия и разной выдержки по времени в печи при температурах 600 °С для ускоренных испытаний и 350 °С для анализа релаксации пружин в эксплуатационных условиях.

По результатам испытаний нержавеющей стали 08X18H10 при температуре 600 °С, получено следующее уравнение для скорости ползучести [6]:

$$\dot{\varepsilon}^c = 2.07 \times 10^{-13} \sigma^{3.65} t^{0.76}. \quad (3)$$

Влияние изменения температуры описывается соотношением:

$$\frac{d\varepsilon^c}{dt} = k \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \sigma^n t^{m-1}. \quad (4)$$

Здесь T_0 - базовая температура плавления; T - текущая температура. Различие скоростей ползучести при двух разных температурах выражается следующей формулой:

$$\dot{\varepsilon}_2^c = \dot{\varepsilon}_1^c \exp\left[\frac{T_0(T_2 - T_1)}{T_1 T_2}\right]. \quad (5)$$

Принимая температуру испытаний $T = 350^\circ\text{C}$, из уравнений (3) и (5) получаем

$$\dot{\varepsilon}^c = 9.71 \times 10^{-14} \sigma^{3.65} t^{0.76}. \quad (6)$$

2. Эксперимент и моделирование

Испытывались винтовые цилиндрические пружины сжатия, материал пружины - нержавеющая сталь 08X18Н10, внешний диаметр 18мм, внутренний диаметр 14мм, диаметр вика 2мм. Предварительно для стабилизации структуры материала пружины в свободном состоянии выдерживались в печи при температуре 350 °С в течении 30 мин[7]. Образцы для испытаний представляли собой болтовые соединения с разной степенью сжатия пружин(рис. 1).



Рис. 1 Пружины исследования под сжатием

Образцы помещались в печь при температуре 350 °С на 24 часа. Затем образцы извлекались из печи, остывали до комнатной температуры, разбирались и измерялись длины пружин и болтов после эксперимента. Исключая изменение длины болта, определялось изменение длины пружины за счет её ползучести. Затем сравнивая длины пружин до и после испытаний, определялась сила сжатия пружины и её релаксация. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры пружин до и после экспериментов

№ пружин	1	2	3
Первоначальные длины пружин(мм)	85,84	87,06	96,50
Длины сжатых пружин(мм)	47,18	57,48	47,16
Длины после эксперимента(мм)	67,63	72,96	70,85
Начальная осадка пружин(мм)	38,47	29,36	49,15
Уменьшение длины пружин из-за ползучести(мм)	18,21	14,10	25,65
Число витка	17,1	17,2	19,2

Полученные экспериментальные результаты используем для сравнения с результатами численного моделирования на основе метода конечных элементов по параметрам пружин в среде Abaqus[8]. Для расчета принята пружина с пятью витками и неподвижным закреплением одного торцевого сечения и смещающегося на заданную величину второго торцевого сечения[9](рис. 2). Сжимаем пружины на эквивалентные степени сжатия при расчете и при эксперименте, поддерживаем это состояние неизменным. Затем, освобождаем их каждые 4 часа и перезагружаем снова, повторяя этот процесс к тому времени, когда общее время составит 24 часа. Процессы нагружения и

разгрузки рассчитываются по уравнениям упругости, а процессы поддерживаемого состояния по уравнению ползучести.

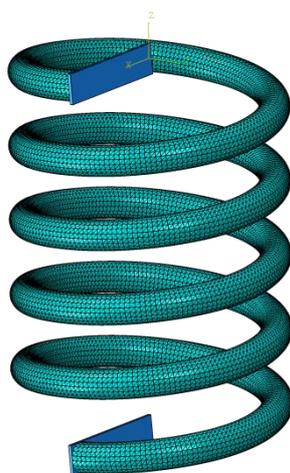


Рис. 2 Моделирование пружины в среде Abaqus

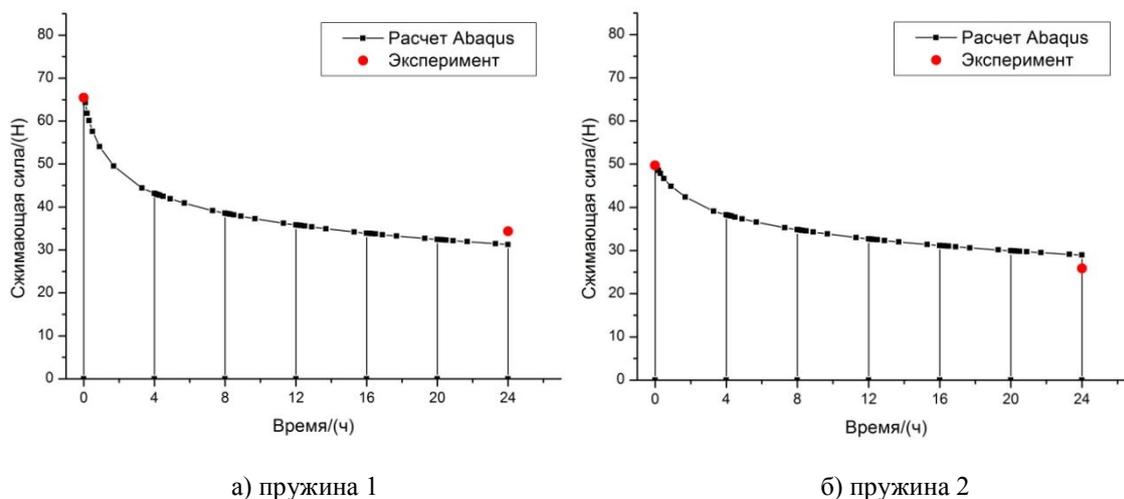
Известно, что значение степени сжатия пружины в упругом состоянии связано с величиной сжимающей силы [10]:

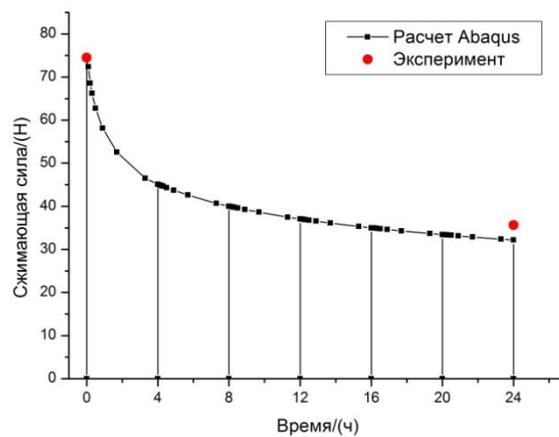
$$\Delta l = \frac{8PnD^3}{Gd^4}. \quad (7)$$

Величина сжимающей силы пружины выражается через изменение её длины:

$$P = \frac{Gd^4\Delta l}{8nD^3}. \quad (8)$$

Поставив значение модули сдвига нержавеющей стали в соотношение (8) при температуре 350 °С, можно получить теоретическую величину сжимающей силы пружины под сжатием. На рис. 3 представлены результаты расчета релаксации силы сжатия пружины на известную величину осадки после разгрузки. Из рисунков можно заключаться, что результаты моделирования и теоретических расчетов совпадают друг с другом, погрешность меньше 10%.

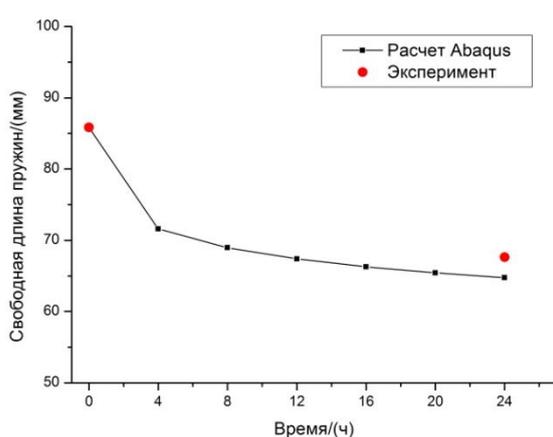




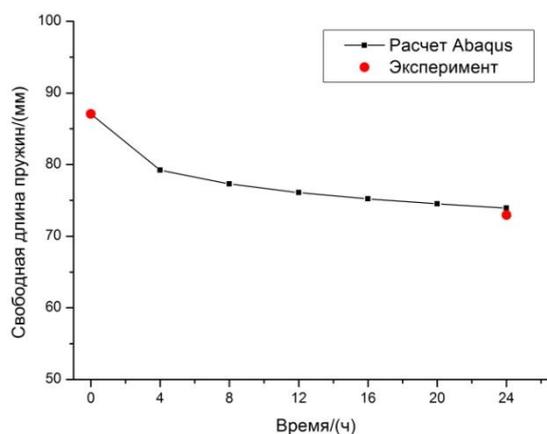
в) пружина 3

Рис. 3 Силы сжатия на пружины

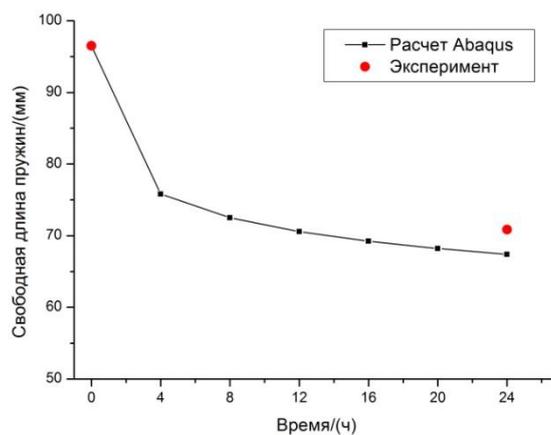
На рис. 4 представлено изменение длин пружин, соответствующие процессу ползучести. На рис. 3 и рис. 4 также нанесены красными точками результаты экспериментов в начальный момент нагружения и после 24 часов испытания. Расхождения теоретических и экспериментальных результатов не превышают 10%.



а) пружина 1



б) пружина 2



в) пружина 3

Рис. 4 Свободные длины пружин на этапах разгрузки

Заключение

В статье установлены зависимости релаксации пружин, работающих при высокой температуре. По результатам испытаний ползучести при температуре 600 °С, конкретизировано теоретическое уравнение ползучести стали, которое затем использовано для анализа при температуре 350 °С. Выполнено численное моделирование пружины с пятью витками в среде Abaqus. Результаты моделирования с использованием Abaqus подтверждаются результатами экспериментов. Исследование показало возможность использования параметров уравнения ползучести, определенных на основе экспериментальных результатов при высоких температурах для прогнозирования ползучести и релаксации пружин, работающих при менее высоких температурах. Новизна работы состоит в прогнозировании величины силы сжатия пружин на основе теоретической модели с учетом изменения температуры в процессе эксплуатации пружин.

Список литературы

1. Bai Mingyuan, Liu Xinling. Prediction on storage life of 65Mn springs // Failure Analysis and Prevention. 2007. Vol. 2, no. 4. P. 10-13.
2. Liu Defu. Creep of spring of steel 44Si2CrV at room temperature // Special Steel. 2007. Vol. 28, no. 4. P. 1-3.
3. Stennett N.A., Campbell D.S. Normal force reduction: a variable activation energy process? [electrical contact springs] // IEEE Transactions of Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A. 1994. Vol.17, no. 1. P. 128-133. DOI: [10.1109/95.296378](https://doi.org/10.1109/95.296378)
4. Shi Chunsheng, Yin Xiyue, Zhao Naiqin. The method of predicting relaxation life of helical springs based on the temperature acceleration of materials: patent CN102507114A China. 2012. 6 p.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 2014. 752 с.
6. Liang Naoyu, Duan Zihua. High-temperature creep numerical simulation of 304 stainless steel componet // Journal of Taiyuan University of Technology. 2013. Vol. 44, no. 3. P. 308-311.
7. Сунь Х., Данилов В.Л. Разработка экспериментального устройства для измерения ползучести и релаксации пружин при высокой температуре // VI Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент»: тез. докл. Тамбов, 2014. С. 306-308.
8. Jiao B.L., Zhang J.D. Torsional modes in piezo helical springs // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1999. Vol. 46, no. 1. P. 147-151. DOI: [10.1109/58.741525](https://doi.org/10.1109/58.741525)
9. Сунь Х., Данилов В.Л. Исследование напряженно-деформированного состояния пружины при высокой температуре с помощью ABAQUS // Наука и образование.

МГТУ им. Баумана, Электрон. журн. 2014. № 5. С. 217-230. DOI:
[10.7463/0514.0710723](https://doi.org/10.7463/0514.0710723)

10. Junqi Qin, Zhao Jin, Changchun Di. Simulation research on reliability enhancement testing of a cylindrical coil spring // World Automation Congress (WAC). 2012. P. 1-4.

Analysis of Helical Stainless Steel 08X18H10 Spring Relaxation at High Temperature

H. Sun^{1,*}, V.L. Danilov¹

[*sunjust@126.com](mailto:sunjjust@126.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: helical spring, relaxation, ABAQUS, stainless steel, high temperature furnace

The object of this paper is to study a cylindrical helical spring to be applied at high temperatures. The aim of this work is to study the regularity of relaxation stresses in spring and evaluate its long-term stresses.

The work allowed us to establish relaxation dependencies of springs under high temperatures. According to the results of creep tests at 600°, the theoretical equation of steel creep was defined concretely. It was then used for the analysis at 350°.

The paper presents a created finite element model of spring relaxation. It is the stainless steel 08X18H10 spring to be used at the temperature of 350°.

In this paper describes the basic theory of creep, considers the relationship between the creep speed and parameters. The changing compression force of springs is analyzed under fixed compression amount.

The paper also analyzes the changing length of springs in the free state after various stages of high-temperature relaxation test. It determines the results of compression forces and free length under different amount of compression.

The analysis to compare the theoretical calculation of the compression forces with the experimental results is conducted. Computer modeling is created in Abaqus for calculation. Spring relaxation experiments are carried out under fixed compression amount and at the temperature of 350°. It is shown that the simulation results, which are carried out in Abaqus coincide with experimental results. The study shows that it is possible to use the creep equation parameters, based on the experimental results at high temperatures, to predict creep and relaxation properties of springs, which work at less high temperatures. The work results can be used as a basis in designing the springs working at high temperatures.

References

1. Bai Mingyuan, Liu Xinling. Prediction on storage life of 65Mn springs. *Failure Analysis and Prevention*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 10-13.

2. Liu Defu. Creep of spring of steel 44Si2CrV at room temperature. *Special Steel*, 2007, vol. 28, no. 4, pp. 1-3.
3. Stennett N.A., Campbell D.S. Normal force reduction: a variable activation energy process? [electrical contact springs]. *IEEE Transactions of Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, 1994, vol.17, no. 1, pp. 128-133. DOI: [10.1109/95.296378](https://doi.org/10.1109/95.296378)
4. Shi Chunsheng, Yin Xiyue, Zhao Naiqin. *The method of predicting relaxation life of helical springs based on the temperature acceleration of materials*. Patent China, no. CN102507114A, 2012.
5. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksii* [Creep of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 2014. 752 p. (in Russian).
6. Liang Haoyu, Duan Zihua. High-temperature creep numerical simulation of 304 stainless steel componet. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, vol. 44, no. 3, pp. 308-311.
7. Sun' H., Danilov V.L. Development of experimental device to measure creep and relaxation of springs at high temperature. *6 Mezhdunarodnaya nauchno-innovatsionnaya molodezhnaya konferentsiya "Sovremennye tverdogaznye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyi menedzhment": tez. dokl.* [Abstracts of the International scientific-innovative youth conference "Modern solid-state technology: theory, practice, and innovation management"]. Tambov, 2014, pp. 306-308. (in Russian).
8. Jiao B.L., Zhang J.D. Torsional modes in piezo helical springs. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, vol. 46, no. 1, pp. 147-151. DOI: [10.1109/58.741525](https://doi.org/10.1109/58.741525)
9. Sun H., Danilov V.L. The study on stress-strain state of the spring at high temperature using ABAQUS. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 217-230. DOI: [10.7463/0514.0710723](https://doi.org/10.7463/0514.0710723) (in Russian).
10. Junqi Qin, Zhao Jin, Changchun Di. Simulation research on reliability enhancement testing of a cylindrical coil spring. *World Automation Congress (WAC)*, 2012, pp. 1-4.