

## **Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга**

**Добрышкин А.Ю.\*, Сысоев О.Е.\*\*, Сысоев Е.О.\*\***

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, КнАГУ,  
проспект Ленина, 27, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

*\*e-mail: [wwwartem21@mail.ru](mailto:wwwartem21@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [fxs@knastu.ru](mailto:fxs@knastu.ru)*

***Статья поступила 26.08.2020***

### **Аннотация**

Модуль упругости материала, а точнее модуль Юнга значительно влияет на свойства материалов, при любой эксплуатации материала. Нельзя не отметить значительный объём исследований, проведенный в этой области. Имеются значения модуля Юнга всех конструкционных материалов при различных условиях работы, в том числе и при различных температурах, например, ниже и выше нуля градусов Цельсия, при одноосном и трехосном сжатии, при увеличенной влажности и давлении. Данное исследование проведено с целью решения проблемы прочности и устойчивости зданий и сооружений при температурном воздействии. Для этого проведен обзор известных данных в области модуля Юнга и выявление самых благоприятных материалов для использования с целью повышения прочности зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** модуль Юнга, конструкционные материалы, композитные материалы, железобетон

Ни одна отрасль человеческой деятельности не обходится без использования элементов в форме замкнутых и разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек. Подобные элементы более просто изготавливать, например, путем прокатки. Часто данные детали подвергаются термическому воздействию, например, сопла двигателей самолетов, обшивка летательных аппаратов [1-3]. Часто при эксплуатации изделия температура воздействия бывает выше 1000 °С. При этом модуль Юнга снижается значительно, и так же прочность.

Проблема сохранения прочности и недеформируемости конструкций при нагревании является актуальной проблемой. С увеличением температуры, уменьшается модуль упругости, прочность конструкции, сооружения или детали уменьшается, что приводит к деформациям, ползучести, трещинам от увеличенных внутренних напряжений, а затем и к разрушению. Современные стальные конструкции пожароопасны. Модуль Юнга Fe (железа) уменьшается на 10% уже при 375 °С. В среднем максимальная температура пламени открытого пожара для горючих газов составляет 1200—1350°С, для жидкостей — 1100—1300°С и для твердых горючих материалов органического происхождения - 1100-1250 °С. Поэтому металлические стальные конструкции не смогут обеспечить несущую способность зданий и сооружений, в условиях наличия колебаний. Пожар возможен в 95% помещений, так как наличию пластика - дешевого и эффективного материала, создаст благоприятные условия мгновенного возгорания. Быстро распространяющийся пожар изменяет температуру несущих конструкций, что приводит к разрушению по первой и второй группе предельных состояний.

Детали машин и механизмов, металлические или пластиковые, при нагревании так же изменяют прочность [4-8]. Данные процессы могут быть усугублены сопровождающимся наличием колебаний, собственных или вынужденных, что сказывается на прочности и общем ресурсе машин и оборудования. Температура плавления пластика, за редким исключением, расположена в пределах 300-500 °С, поэтому пластиковые изделия не могут быть опорой при работе в температурном диапазоне выше 150 градусов.

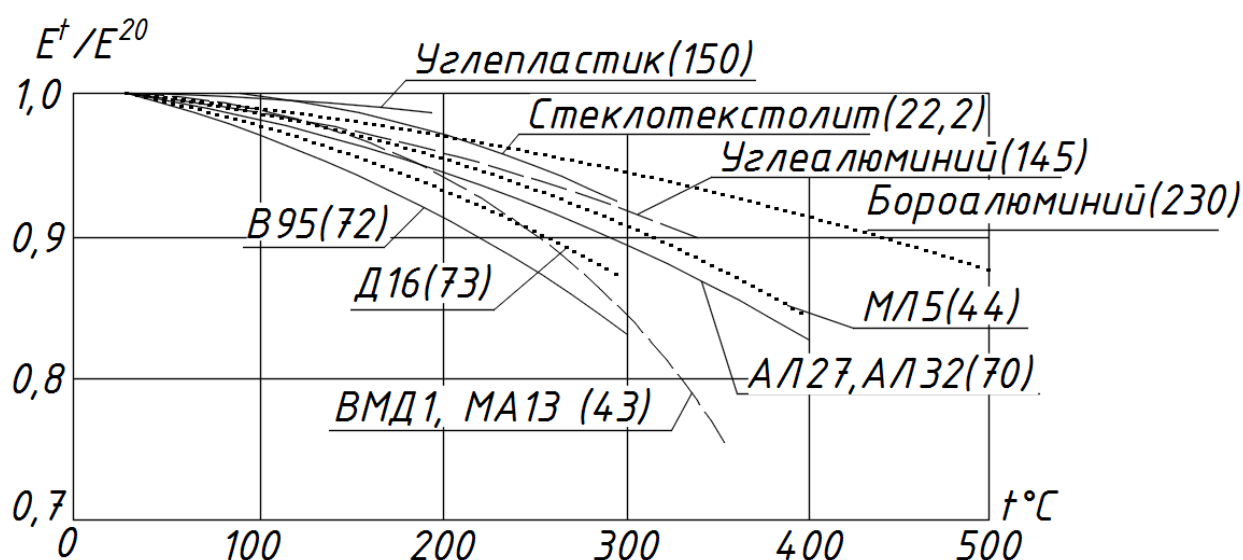


Рисунок 1 – Зависимость модуля упругости от температуры пластиков

Железобетонные конструкции так же не обладают достаточной прочностью. При 250 – 300 °С - снижается прочность, что сопровождается процессом разложения внутренней структуры цементного камня. При 550 °С зерна кварца, которые имеются в песке и щебне для бетона, начинают растрескиваться и кварц переходит в другое состояние – тридимит. Растрескивание обусловлено увеличением кварцевых зерен в объеме. При этом в структуре пласта возникают микротрещины в местах

соприкосновения цементного камня с наполнителем. При увеличении температуры свыше 550 °С разрушаются и прочие структурные элементы бетона. На рисунке 2 видим значимое снижение модуля Юнга бетона В25 при повышении температуры до 200 °С. Прочность бетона снижается на 25%.

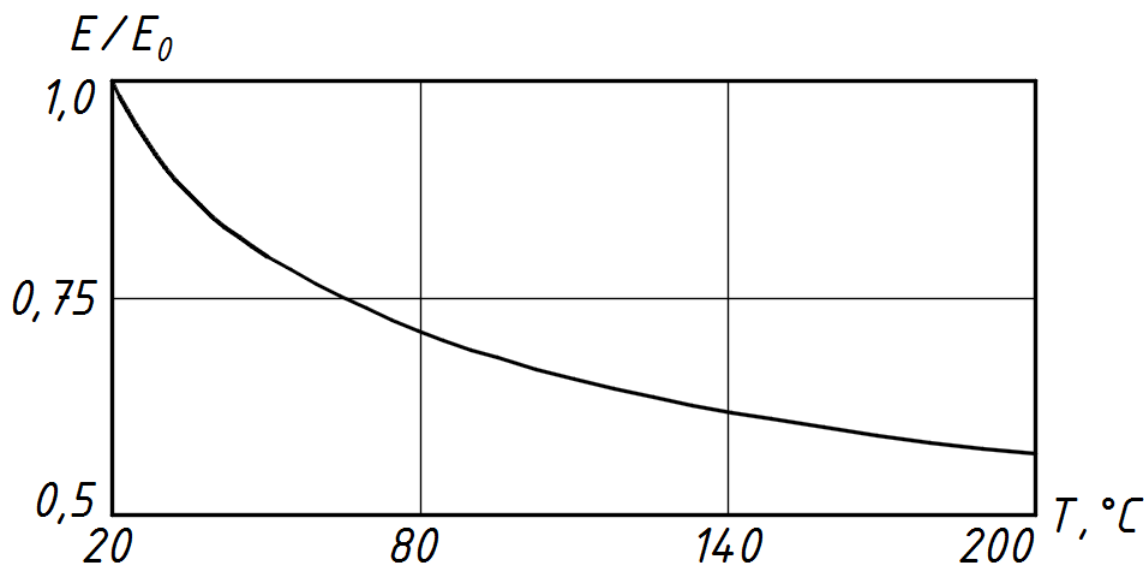
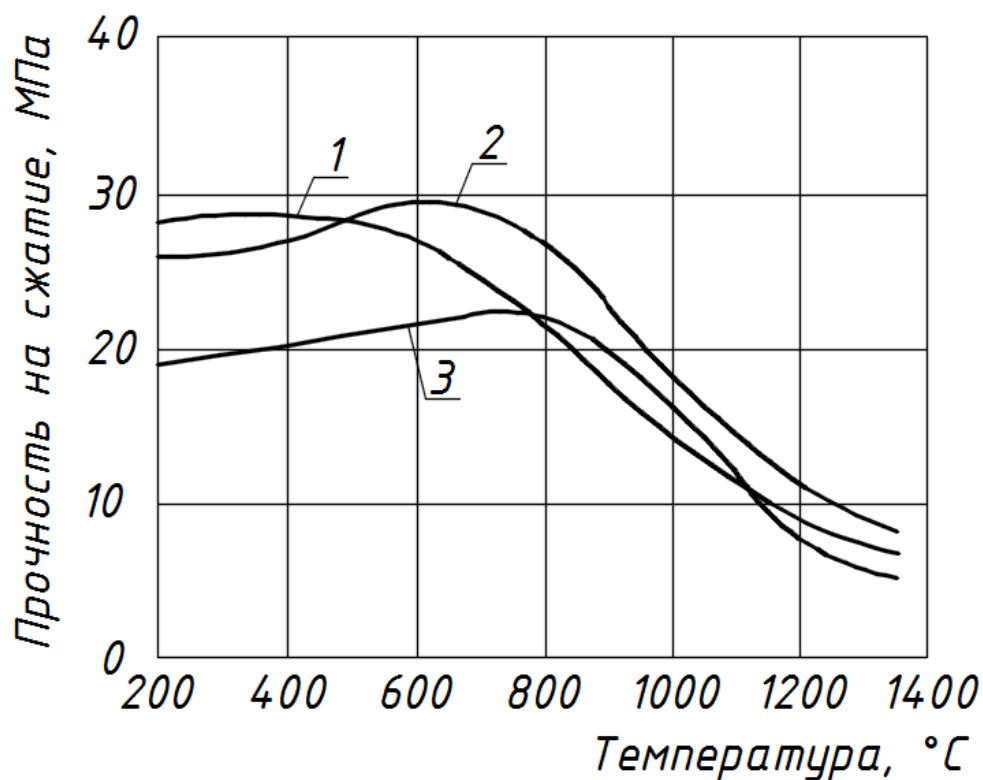


Рисунок 2 – Зависимость модуля упругости от температуры бетона В25

Высокопрочные бетоны на различных заполнителях и при разнообразных вариантах твердения не способны обеспечить прочность и устойчивость зданий в условиях пожара или жароопасной эксплуатации (Рисунок 3). Как видно из рисунка 3 жаростойкий бетон после обжига при 1350°С при температуре выше 1000°С становится неэффективным в использовании, т.е. теряет прочность на сжатие на величину более 10%. Шамотный огнеупор и жаростойкий бетон после сушки теряет прочность на сжатие более 10 % при меньшей температуре: 600 и 800 °С соответственно.



1 – шамотный огнеупор; 2 – жаростойкий бетон после сушки;  
3 – жаростойкий бетон после обжига при 1350°C.

Рисунок 3 - Зависимость прочности на сжатие при различных температурах нагрева

Как видно из рисунка 4, сплавы вольфрама, например, 30ReW (30% рения, 70% вольфрама) изначально обладают большей прочностью, но при 230 °C теряют более 10% своей прочности [9-13].

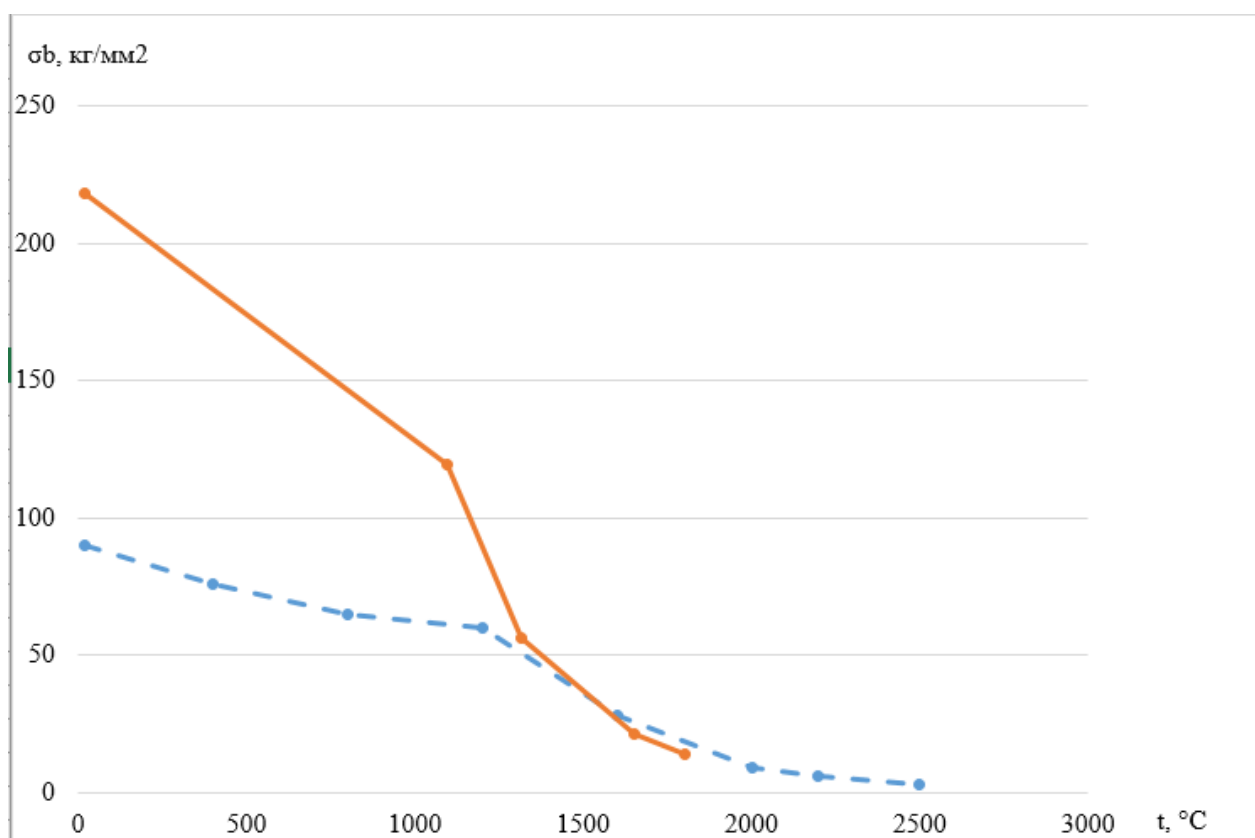


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности от температуры

Сплошная линия – W (вольфрам), пунктирная линия – сплав 30ReW

Цель данной работы состояла в том, чтобы изучить зависимость механических свойств образцов оболочки от температуры при проведении экспериментов. В настоящее время сплавы с памятью формы становятся очень популярными. Стальной сплав X17 и алюминиевой сплав Д12 (3004 спецификации Alclad) являются одними из самых известных представителей таких сплавов.

Марка сплава образцов определена по их химическому составу с использованием декартового энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного спектрометра «NEX CG Rigaku» и установлена согласно ГОСТ 9940-81 для X17 и ГОСТ 4784 – 97 для Д12 [14-17].

Таблица 1 – Химический состав стали сплава X17 образца определённый ГОСТ 9940-81.

Марка материала	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Химический состав %	0,133	0,326	0,325	0,221	0,215	16,75	0,035	0,160	0,016
Марка материала	Co	Nb	Ti	V	W	Zn	Zr	Fe	
Химический состав %	0,021	0,016	0,0016	0,110	<0,010	0,017	0,0063	81,63	

Таблица 2 – Физико-механических свойства стали сплава X17.

T (°C)	20	50	100	150	200	250	300
<i>E 10<sup>-6</sup> (Mпа) X17</i>	2,32	2,30	2,27	2,23	2,19	2,15	2,11
<i>E 10<sup>-6</sup> (Mпа) Д12</i>	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63

Химический состав образцов стального и алюминиевого сплава Д12 (3004 спецификации Alclad) ГОСТ 4784 – 97 определялись с использованием установки ASMAN -04.

Таблица 3 – Химический состав образца из алюминиевого сплава Д12.

Марка материала	Al	Mn	Mg	Fe	Si	Cu	Zn
Химический состав %	95,7-98,2	1,0-1,5	0,8-1,3	0,7	0,30	0,25	0,25

Таблица 4 – Физико-механические свойства Д12. ГОСТ 4784 – 97.

T (°C)	20	50	100	150	200	250	300
<i>E 10<sup>-6</sup> (Mпа)</i>	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63

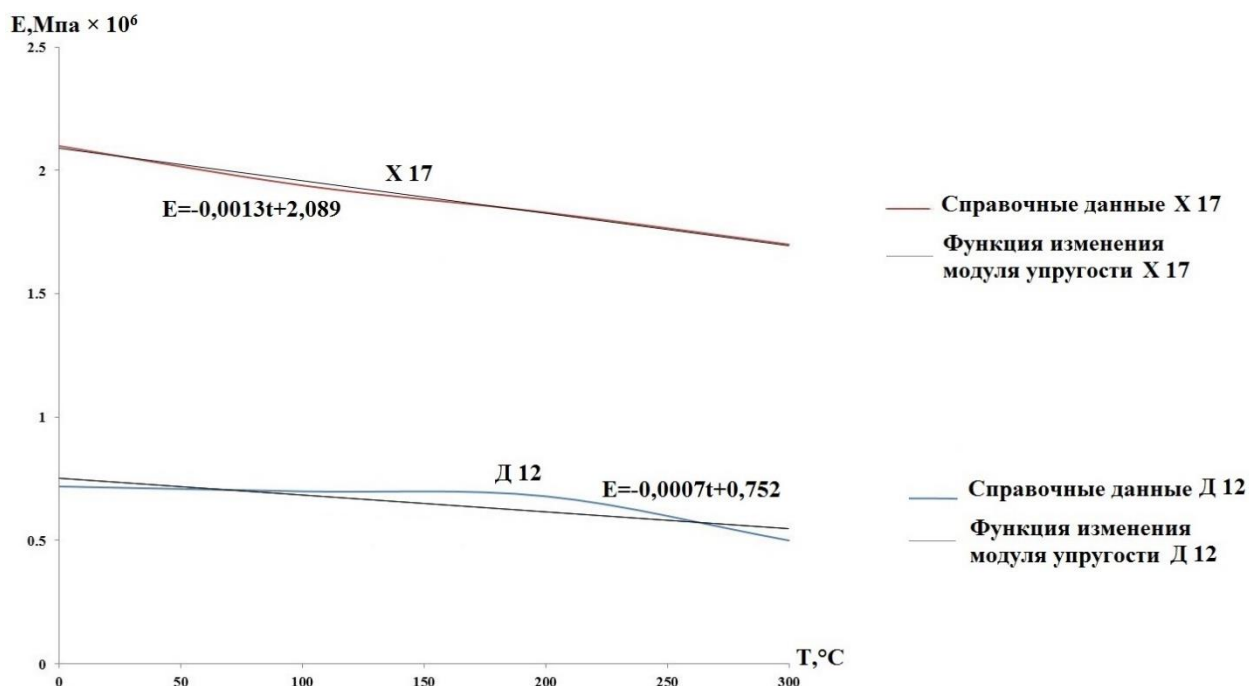


Рисунок. 5 - Изменение модуля упругости стали сплава X17 и алюминиевого сплава Д12 от температуры.

Существует возможность получения некоторых сплавов X17 и алюминиевых сплавов Д12 (3004 спецификации Alclad) с исходным состоянием оболочки с использованием технологии формования из расплава. Известно, что механические свойства материалов оболочки сильно зависят от температуры, поэтому очень важно исследовать свойства оболочек из стальных сплавов X17 и алюминиевых сплавов Д12 (3004 спецификации Alclad), расплавленных при различных температурах [18-21].

Исследованы образцы из тонкостенной цилиндрической оболочки из сплава стали X17 и алюминиевого сплава Д12 с геометрическими характеристиками, представленными в таблице 5.



$a_0$	$b_0$	$F_0$ $= a_0 * b_0$	$l =$ $l_0 = 5.65\sqrt{F_0}$	$h$	$h_0$	$r$	$B$	$L = l + 2(h + h_1)$
0,5	10	5мм <sup>2</sup>	12,63	40	15	25	20	122.63

Таблица 5- Размеры образца из сплава стали X17.

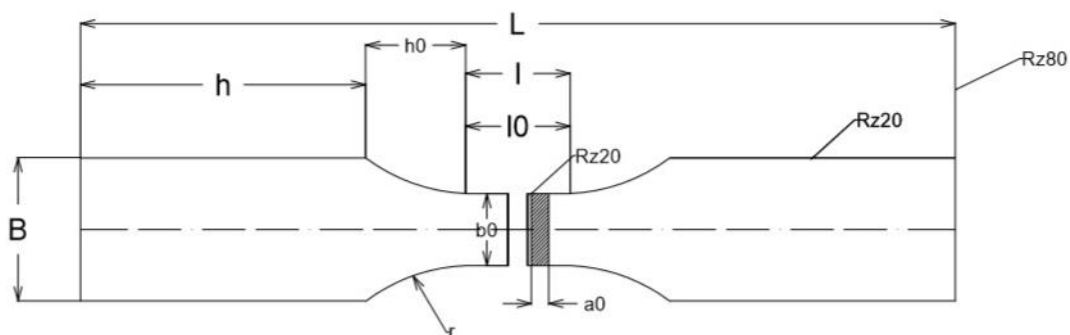


Рисунок 6 – Геометрическая форма испытательного образца.

Принципиальная схема растягиваемого (испытываемого) образца показана на рисунке 6. Крестовины и захваты установлены на верхней и нижней головке машины. Образцы были помещены в специально разработанные и изготовленные захваты, которые были закреплены в держателях машины.



Рисунок 7 - Образца оболочки из сплава стали X17 (Лист тонкий - ГОСТ 5582-75).

Исследование механических свойств проводилось с использованием машины для растяжения Shimadzu, в то время как температура поддерживалась в термокамере Shimadzu TCE-N300. Основные функциональные составляющие, обеспечивающие значительную работоспособность машины Shimadzu:

- Тензодатчик производит измерение с ошибкой в диапазоне от 1/500 до 1/450 номинального значения, и гарантирует точность испытательных данных до  $\pm 0,5\%$  от номинального значения, охватывает широкий диапазон числовых характеристик колебаний. Номинальное значение тензодатчика сохраняется в калибровочном состоянии и автоматически распознается при подключении кабеля.

- Термостатическая камера позволяет проводить испытания в воспроизводимых операционных средах. Использование центрально-растягивающего усилия (удлинительный соединительный стержень, входящий в комплект для растяжения в камере) позволяет расположить ручки внутри термостатической камеры, тем самым сохраняя параметры создаваемой среды внутри камеры.

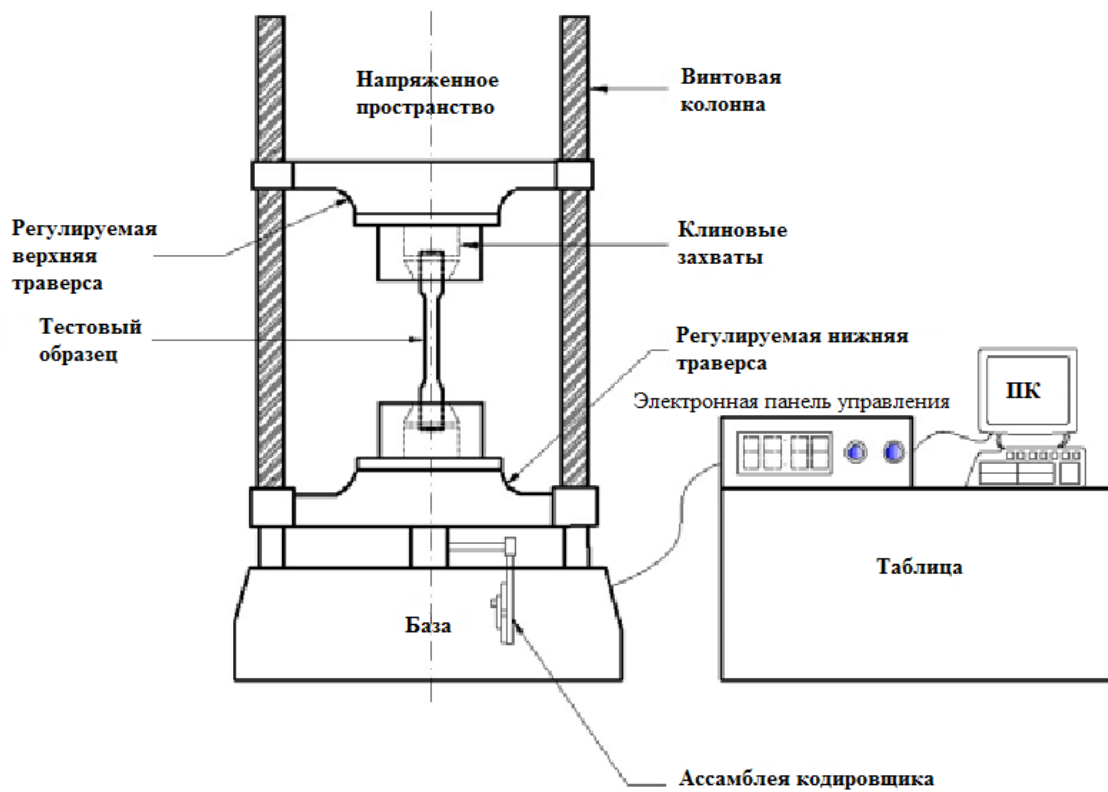


Рисунок 8 - Принципиальная схема машины для испытания на растяжение.



Рисунок 9 - Экспериментальная установка SHIMADZU TCE-N300 с термостатической камерой.

На рисунках (10 и 17) кривые напряжение-деформация показывают небольшое изменение между результатами, полученными для случая комнатной температуры 20°C и 300°C, так что измеренные значения напряжения очень близки в семи тестах (20°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C и 300°C). Переход между упругой зоной и пределом текучести аналогичен с учетом экспериментов, выполненных при 20 и 100 ° С, и экспериментов, выполненных при 200 и 300 ° С. Однако, в испытаниях, принимающих 200 ° С и 300 ° С, наблюдается значительное увеличение (приблизительно 11%) измеренных значений напряжения (более выраженный эффект отверждения).

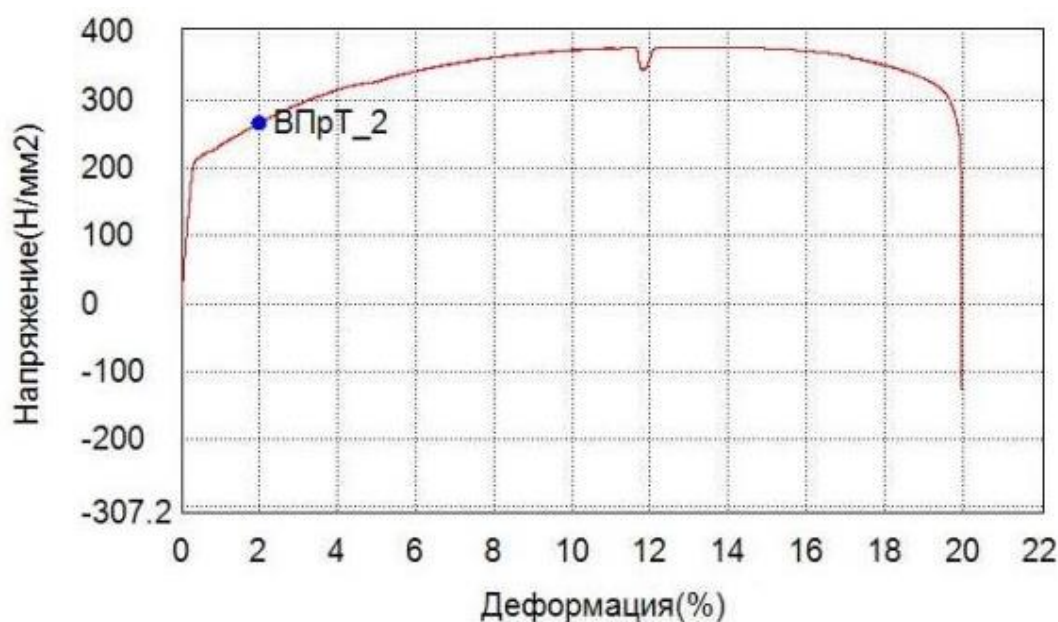


Рисунок 10 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 20°C.



Рисунок 11 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 50°C.

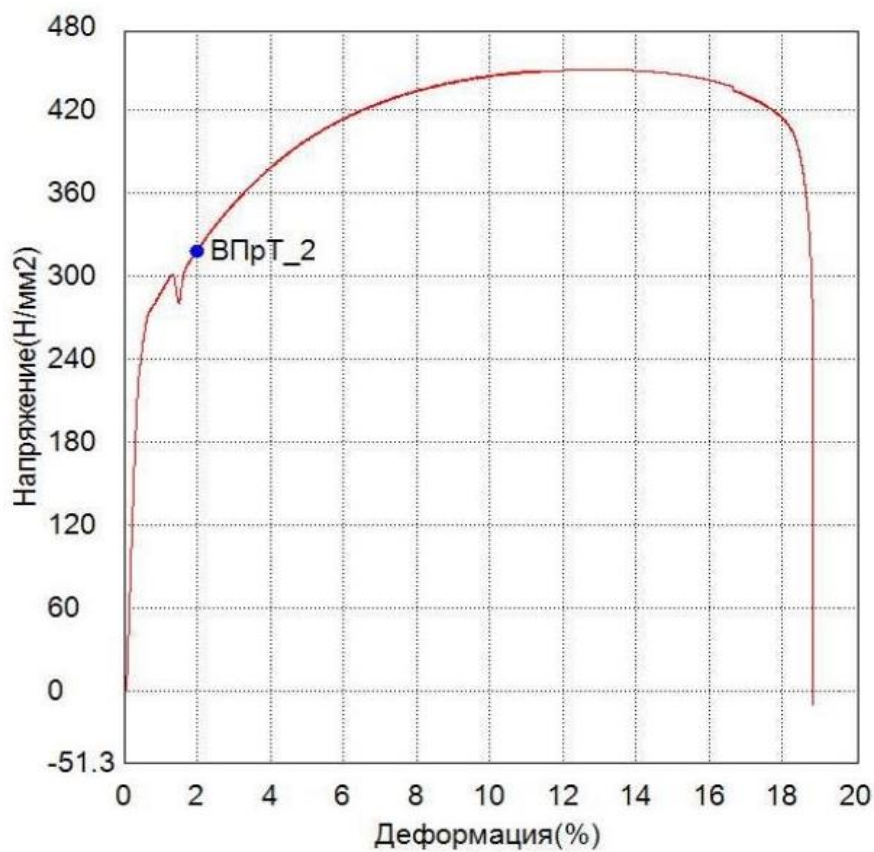


Рисунок 12 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 100°C.

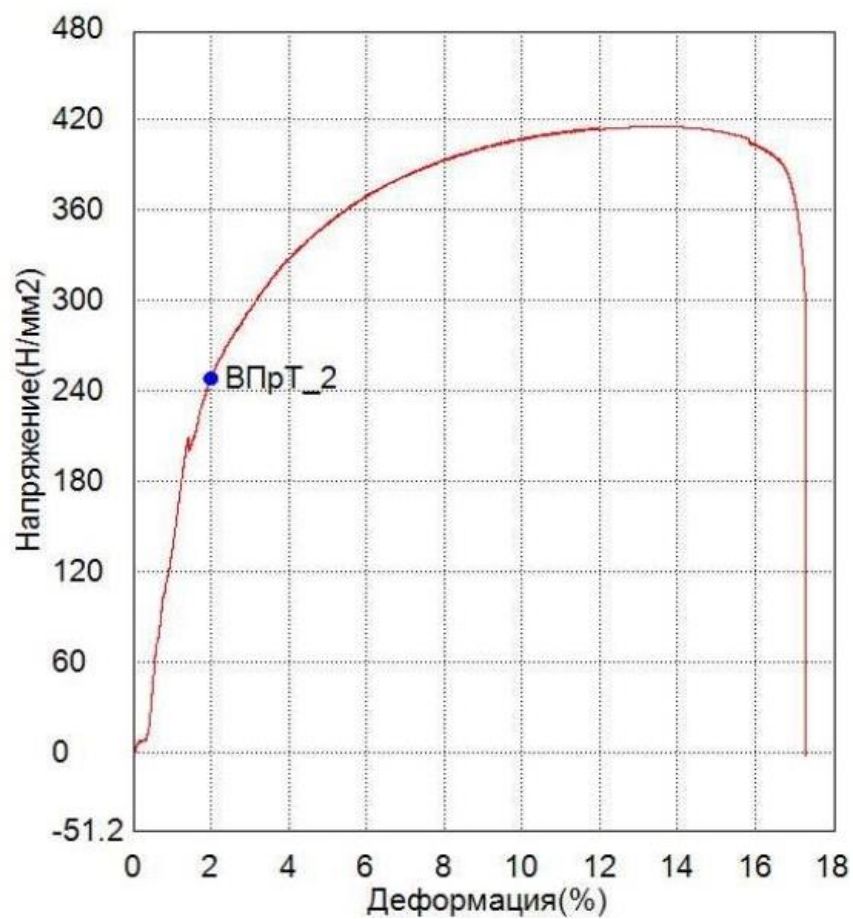


Рисунок 13 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 150°C.

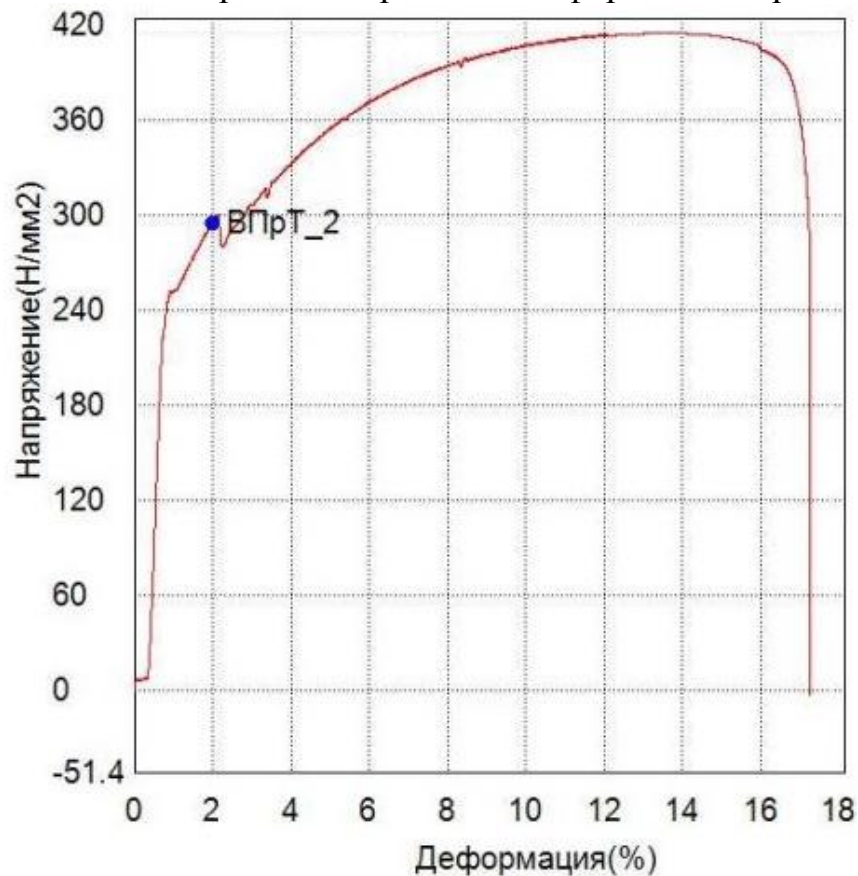


Рисунок 14 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 200°C.

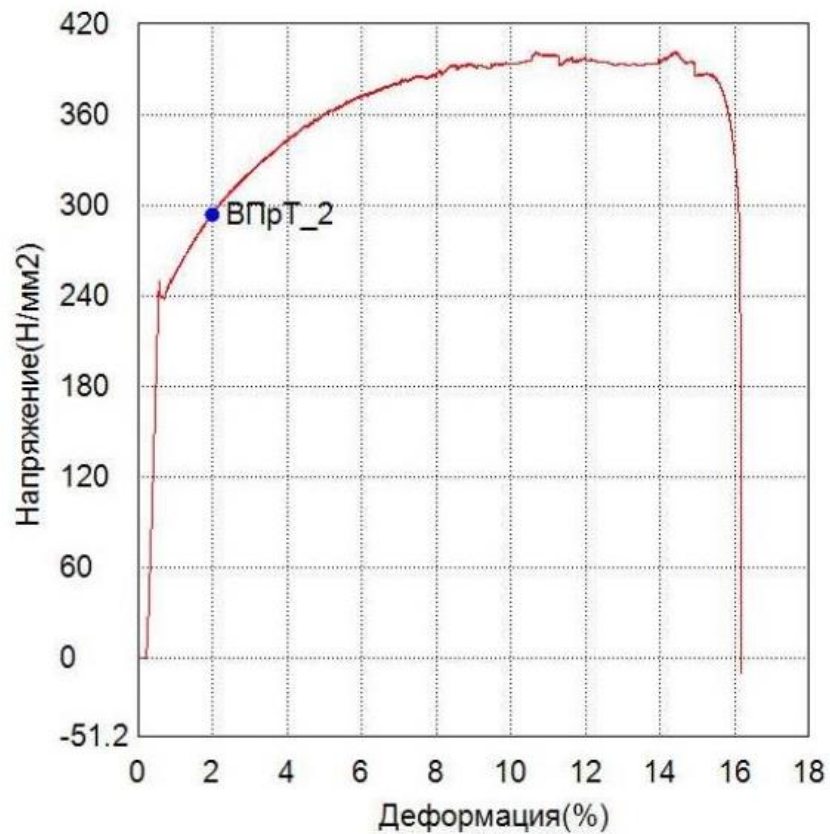


Рисунок 15 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 250°C.

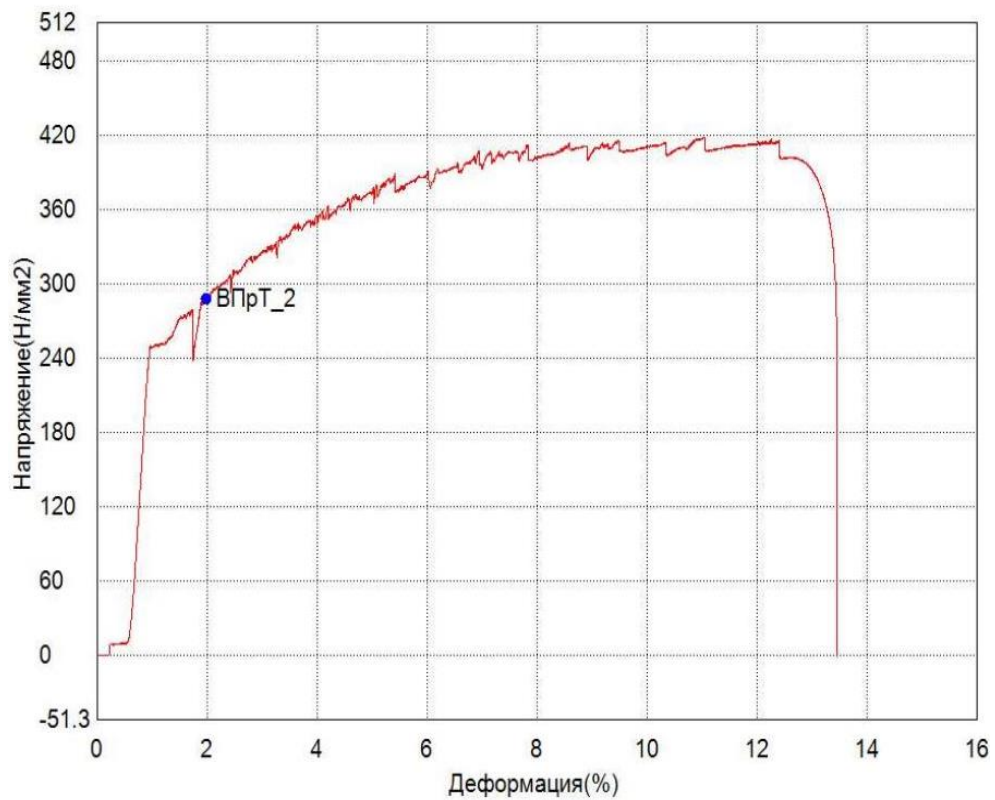


Рисунок 16 - Изменение кривой напряжения-деформации образца при 300°C.

Во время экспериментальных испытаний было обнаружено, что образцы теряют часть пластичности при воздействии температуры до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это было подтверждено испытанием на растяжение до разрушения и заключительным этапом визуальной проверки центральной части образца. Время испытания на растяжение при комнатной температуре составляло приблизительно один час, в то время как в случаях  $100$  и  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  это время уменьшалось до приблизительно 30-40 минут. С повышением температуры до значений выше  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  повышается пластичность.

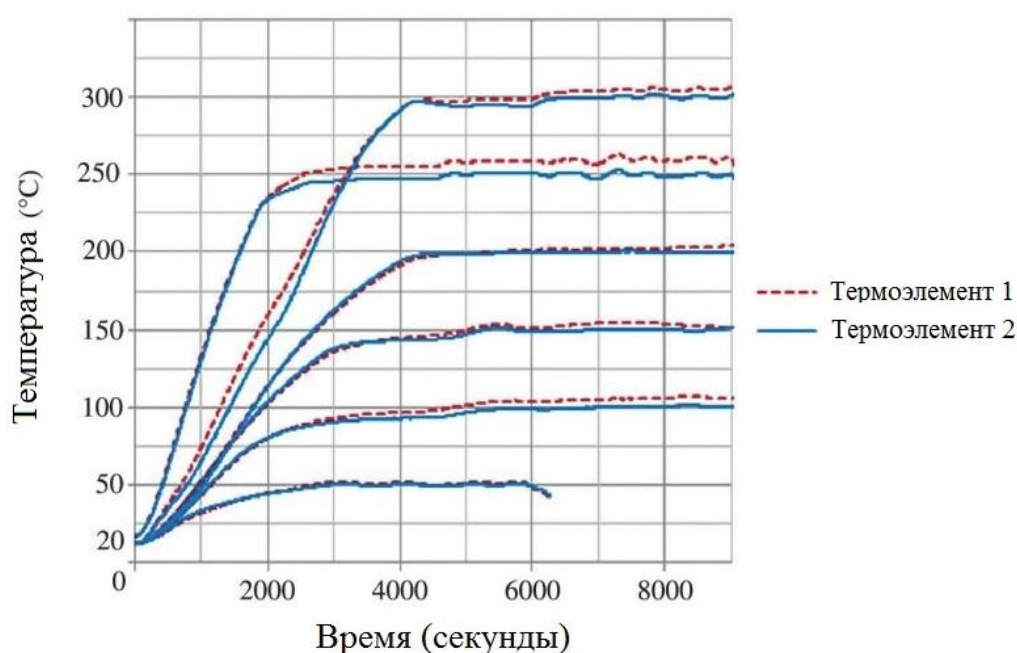


Рисунок 17- Температурные колебания образцов как функция времени в секундах.

Зависимость модуля упругости от температуры (рис. 18) сплава, взятого с промышленной установки, и классифицированного по химическому анализу названий образцов (таблица 2), как сплав X17, была получена экспериментально на установке термостатической камеры ТСЕ-N300 (рис. 9).



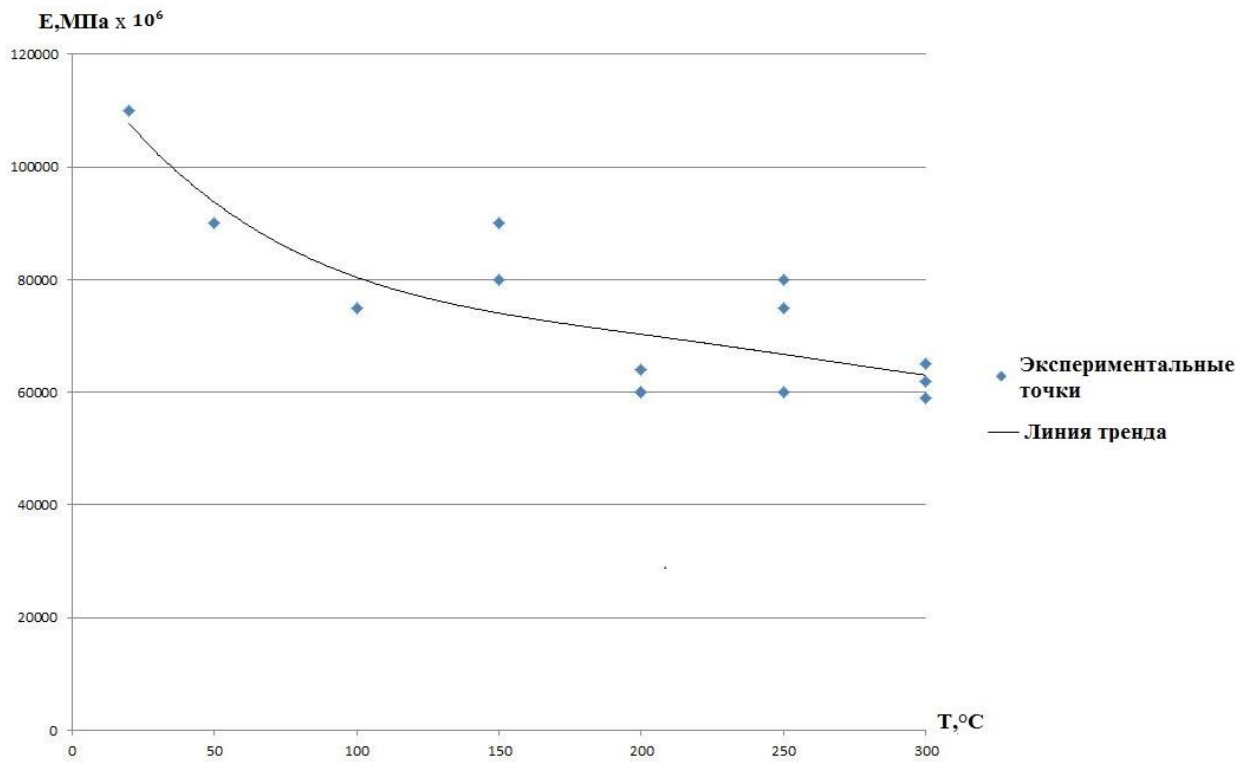


Рисунок 18 - Зависимость модуля упругости сплава X17 от температуры.

Сравнение справочных и экспериментальных модулей упругости для сплавов X17 и Д12 рис. (19).

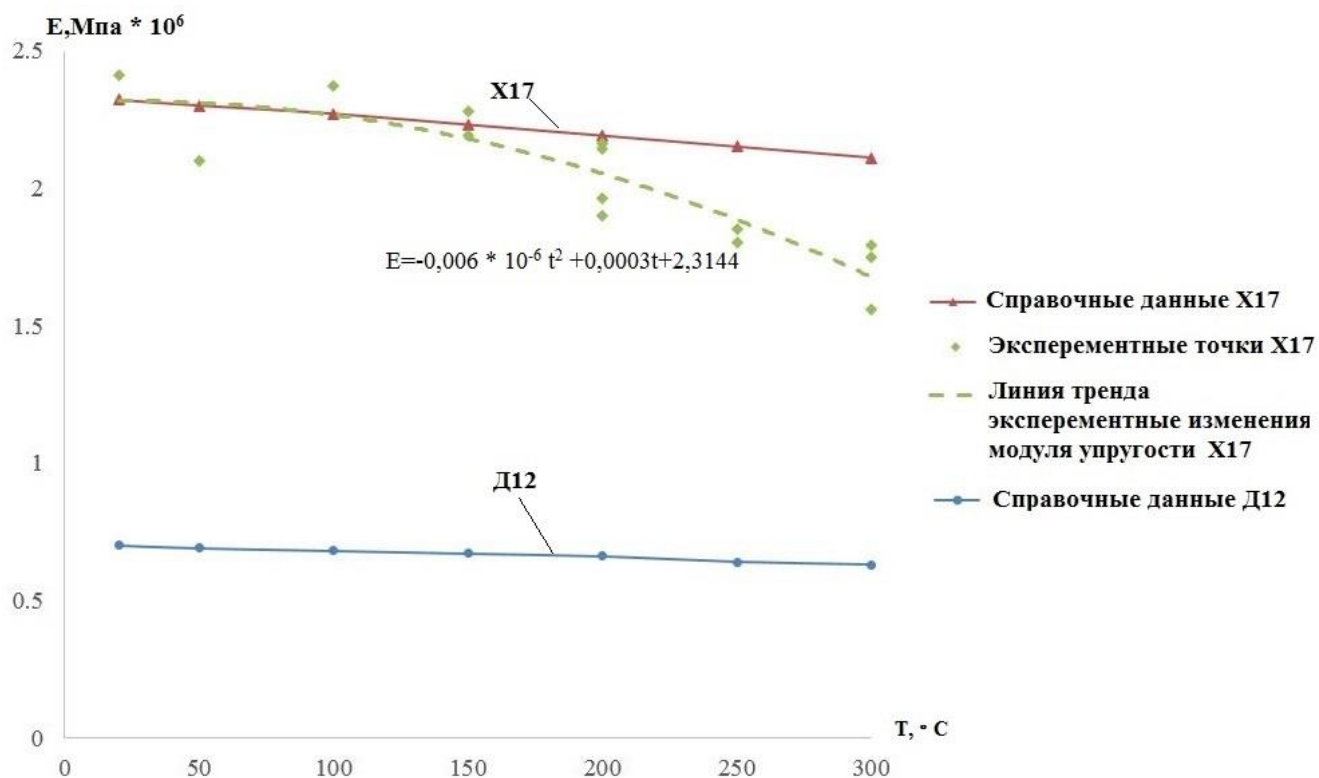


Рисунок 19 - Зависимость модуля упругости от температуры.

### Выводы

Вольфрам и его сплавы можно эффективно использовать для сохранения прочности и устойчивости зданий и сооружений, машин и механизмов. Он может быть применен в качестве включений (имеется ввиду, что всю деталь мы заменить не можем, но можем заменить болты, либо выступающие внешние элементы конструкции – закладные детали, например, либо делать композитный материал) в несущие и опорные элементы. Высокая его стоимость не позволяет заменить габаритные элементы полноценно. При первом нагревании вольфрам покрывается оксидной пленкой. В качестве частей деталей и машин, опорных конструкций зданий и сооружений, подверженных нагреванию данный металл стоит использовать. В ходе проведения исследований получены следующие результаты – численные

характеристики колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки при изменении температуры и различных условиях закрепления испытательных образцов:

- изучены экспериментальные данные частотных спектров колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек при различных температурах
- получены экспериментальные зависимости влияния температуры на изменение модуля Юнга материала.

Результаты, описанные в данной работе полезны для проектировщиков летательных аппаратов, так как материалы, рассматриваемые в данной работе, используются в авиакосмической промышленности.

### **Библиографический список**

1. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
2. Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. – Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
3. Антуфьев Б.А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
4. Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн Сит Наинг. Аналитическое и экспериментальное исследование свободных колебаний разомкнутых оболочек из сплава Д19, несущих систему присоединенных масс // Труды МАИ. 2018. № 98.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90079>

5. Z. Wang, Q. Han, D.H. Nash, P. Liu. Investigation on inconsistency of theoretical solution of thermal buckling critical temperature rise for cylindrical shell // *Thin-Walled Structures*, 2017, no. 119, pp. 438 – 446. DOI: [10.1016/j.tws.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.002)
6. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing, Baenkhaev A.V. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell // *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 885 – 892. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885)
7. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu. Natural vibration of a thin desing with an added mass as the vibrations of a cylindrical shell and curved batten // *Journal of Heilongjiang university of science and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 75 - 78.
8. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing. Nonlinear Oscillations of Elastic Curved plate carried to the associated masses system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 262. DOI: [10.1088/1757-899X/262/1/012055](https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012055)
9. Y. Qu, Y. Chen, X. Long, H. Hua, and G. Meng. Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method // *Applied Acoustics*, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 425 - 439.
10. Y. Qu, H. Hua, and G. Meng. A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries // *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 307 – 321.
11. Y. Xing, B. Liu, and T. Xu. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 75, pp. 178 – 188.

12. M. Chen, K. Xie, W. Jia, and K. Xu. Free and forced vibration of ring-stiffened conical–cylindrical shells with arbitrary boundary conditions // Ocean Engineering, 2015, vol. 108, pp. 241 – 256.
13. H. Li, M. Zhu, Z. Xu, Z. Wang, and B. Wen. The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary // Shock and Vibration, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4709257>
14. Foster N., Fernández–Galiano L. Norman Foster in the 21st Century, Monografias, Artes Gráficas Palermo, 2014, 328 p.
15. Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. One-dimensional models in turbine blades dynamics // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, vol. 9, pp. 93 – 104.
16. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.
17. Белосточный Г.Н., Мыльцина О.А. Статическое и динамическое поведение пологих оболочек под действием быстропеременных температурно-силовых воздействий // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58524>
18. Кузнецова Е.Л., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В., Медведский А.Л. Воздействие нестационарной распределенной нагрузки на поверхность упругого слоя // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46621>
19. Demin A.A., Golubeva T.N., Demina A.S. The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field // 11th Students' Science Conference «Future Information technology solutions», Bedlewo, 3-6 October 2013, pp. 61 – 66.

20. Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А. Численно-экспериментальное исследование деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии // Труды МАИ. 2015. № 82. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=58589>

21. Грушенкова Е.Д., Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Продольные и изгибные колебания трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем, контактирующей со слоем вязкой жидкости // Труды МАИ. 2019. № 106. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=105618>

# Temperature impact on the elasticity modulus of structural materials

**Dobryshkin A.Yu.\***, **Sysoev E.O.\*\***, **Sysoev O.E.\*\***

*Komsomolsk-on-Amur State University,  
27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia*

*\*e-mail: [wwwartem21@mail.ru](mailto:wwwartem21@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [fs@knastu.ru](mailto:fs@knastu.ru)*

## **Abstract**

Elasticity modulus of a material, to be more exact Young's modulus, significantly affects the figures while any operation of the material. Thus, the attention to this indicator long since cases interest. It should be noted that a significant u of research has been conducted in this area. There are indicators of the Young's modulus of all structural materials, as well as its indicators at various operating conditions, including those at various temperatures, e.g. above and below zero Centigrade. The presented study was conducted with the purpose of solving the problem of buildings and structures strength and stability under the temperature effect. To do this, the review of the well-known data in the Young's modulus area was performed, and revealing the most advantageous materials for implementation with the purpose of buildings and structures strength enhancing.

Not a single branch of human activities can do without employing the elements in the form of closed and open thin-walled cylindrical shells. These are, for example: hangars, pipelines, missiles, submarines, boats, aircraft and other elements. There are quite a few elements in the form of open and closed shells in the form of machine parts and mechanisms. This form of structures has become widespread due to their higher efficiency compared to the others such as, rectangular structures and parts, since less

material is spent on their manufacturing. Besides, it is easier to manufacture such elements, for example, by rolling. Often these parts, such as aircraft engine nozzles, or aircraft skin, are affected thermally. This phenomenon creates many difficulties, since the exposure temperatures are often above 1000°C. The Young's modulus herewith is being significantly reduced, the same relates to the strength as well.

**Keywords:** Young's modulus, structural materials, composite materials, reinforced concrete.

### References

1. Vlasov V.Z. *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike* (General theory of shells and its application in technology), Moscow-Leningrad, Gostekhizdat, 1949, 784 p.
2. Kubenko V.D., Koval'chuk P.S., Krasnopol'skaya T.S. *Nelineinoe vzaimodeistvie form izgibnykh kolebaniy tsilindricheskikh obolochek* (Nonlinear interaction of bending vibrations' shapes of cylindrical shells), Kiev, Naukova dumka, 1984, 220 p.
3. Antuf'ev B.A. *Kolebaniya neodnorodnykh tonkostennykh konstruktsii* (Oscillations of inhomogeneous thin-walled structures), Moscow, Izd-vo MAI, 2011, 176 p.
4. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Yu., Nein Sit Naing. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90079>



5. Z. Wang, Q. Han, D.H. Nash, P. Liu. Investigation on inconsistency of theoretical solution of thermal buckling critical temperature rise for cylindrical shell, *Thin-Walled Structures*, 2017, no. 119, pp. 438 – 446. DOI: [10.1016/j.tws.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.002)
6. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing, Baenkhaev A.V. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell, *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 885 – 892. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885)
7. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu. Natural vibration of a thin desing with an added mass as the vibrations of a cylindrical shell and curved batten, *Journal of Heilongjiang university of science and technology*, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75 - 78.
8. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu., Nyein Sitt Naing. Nonlinear Oscillations of Elastic Curved plate carried to the associated masses system, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 262. DOI: [10.1088/1757-899X/262/1/012055](https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012055)
9. Y. Qu, Y. Chen, X. Long, H. Hua, and G. Meng. Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method, *Applied Acoustics*, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 425 - 439.
10. Y. Qu, H. Hua, and G. Meng. A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries, *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 307 – 321.
11. Y. Xing, B. Liu, and T. Xu. Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 75, pp. 178 – 188.

12. M. Chen, K. Xie, W. Jia, and K. Xu. Free and forced vibration of ring-stiffened conical–cylindrical shells with arbitrary boundary conditions, *Ocean Engineering*, 2015, vol. 108, pp. 241 – 256.
13. H. Li, M. Zhu, Z. Xu, Z. Wang, and B. Wen. The influence on modal parameters of thin cylindrical shell under bolt looseness boundary, *Shock and Vibration*, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4709257>
14. Foster N., Fernández–Galiano L. *Norman Foster in the 21st Century*, Monografias, Artes Gráficas Palermo, 2014, 328 p.
15. Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. One-dimensional models in turbine blades dynamics, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 9, pp. 93 – 104.
16. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. *Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models*, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.
17. Belostochnyi G.N., Myl'tsina O.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58524>
18. Kuznetsova E.L., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V., Medvedskii A.L. *Trudy MAI*, 2013, no. 71. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46621>
19. Demin A.A., Golubeva T.N., Demina A.S. The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field, *11th Students' Science Conference "Future Information technology solutions"*, Bedlewo, 3-6 October 2013, pp. 61 – 66.
20. Nushtaev D.V., Zhavoronok S.I., Klyshnikov K.Yu., Ovcharenko E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58589>

21. Grushenkova E.D., Mogilevich L.I., Popov V.S., Popova A.A. *Trudy MAI*, 2019, no.

106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105618>