
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 623.454.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ
РАБОТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

© 2015 Д.С. Горюшкин, Ю.С. Зуев, А.В. Стахеев

*Снежинский физико-технический институт –
Филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Челябинская обл., Россия*

Предложена методика расчета наукоемких изделий при действии на них статических механических нагрузок при комнатных температурах. Проведенные численные расчеты на образцах из инертных материалов дают предварительные оценки величины прогибов и деформаций ползучести в конструкциях. Верификация предложенной методики будет выполнена на основе приведенных экспериментов на образцах из инертных материалов. Исследуется возможность переноса результатов численных расчетов на масштабные модели.

Ключевые слова: критические нагрузки, инертные материалы, перемещение, деформация ползучести, конечно-элементная модель, экспериментальное обоснование.

Поступила в редакцию 22.11.2015 г.

В связи с постоянным повышением требований к условиям эксплуатации элементов сооружений, возникает необходимость исследования работы конструкций с учетом возможности появления необратимых деформаций. Во время транспортировки опасных грузов в элементах специальных контейнеров возможна реализация ползучести материалов при длительном воздействии внешних и внутренних сил и температур, при этом нагрузки, действующие на корпус контейнера, могут быть медленно и быстро меняющиеся. Есть нагрузки, действующие годами, а есть такие, время действия которых исчисляется миллионными долями секунды. В зависимости от указанных обстоятельств, механические свойства материалов будут проявляться по-разному. Реализация деформаций ползучести в контейнерах может привести к нарушению конструкторской схемы изделия при совместном действии температурных и инерционных воздействий. Исследование характеристик ползучести материалов представляет собой актуальную задачу в целях обоснования прочности и надежности конструкции. В настоящей работе на основе численного метода рассматривается поведение материалов при нормальной температуре и низких уровнях нагружения. Верификация предложенной методики будет выполнена на основе приведенных экспериментов на образцах из инертных материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обобщающий анализ свойств материалов с учетом времени действия нагрузки и температуры оказывается очень сложным и не укладывается в простые экспериментально полученные кривые. При совместном действии постоянных нагрузок и температур, изменяющихся по времени, у конструкционных материалов обнаруживается новое свойство – ползучесть. Явление ползучести зависит от множества факторов, как внешних, так и внутренних (старение материала, размер

зерна). Как известно, ползучесть материалов описывается кривой ползучести, которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянной температуре и приложенной нагрузке (или напряжении). Зависимость деформации ползучести от времени имеет нелинейный характер и сильно зависит от уровня приложенной нагрузки. При повышении температуры испытания, скорость ползучести также растет. Ввиду изгибного характера деформирования материалов внутри контейнера, при испытаниях на ползучесть должны использоваться аналогичные схемы нагружения образцов из исследуемого материала.

Экспериментальная работа включает в себя проведение испытаний на изгиб с определением разрушающей нагрузки F , затем исследование характеристик ползучести материала при уровнях постоянной нагрузки в интервале (0,1 - 0,6) от значения разрушающей нагрузки F , полученной при испытаниях на изгиб.

В настоящей работе выполнено численное моделирование опытов на изгиб и ползучесть с использованием образцов из инертных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗГИБ И ПОЛЗУЧЕСТЬ

Для верификации результатов численных расчетов требуется проведение экспериментов на изгиб и ползучесть на образцах из инертных материалов. Для отработки нагружения используются образцы из алюминиевого сплава Д16 ГОСТ 4784-97 и меди М1 ГОСТ 859-2001. Выбор материалов обусловлен наличием низкотемпературной ползучести у данных материалов при относительно низких уровнях нагружения. Для выбора и обоснования размеров образцов из инертных материалов был проведен предварительный численный расчет. Образец для проведения испытаний выбран с прямоугольным сечением: толщина – 2 мм, ширина – 10 мм и длина – 55 мм. Такая форма более удобна для проведения измерений перемещений, деформаций образца и применяется при исследовании характеристик материалов при изгибе согласно ГОСТ 14019-2003 [1].

Согласно ГОСТ 14019-2003 в качестве схемы испытания образцов на изгиб при комнатной температуре используется изгибающее устройство с тисками. Схема испытания образцов на изгиб показана на рисунке 1.

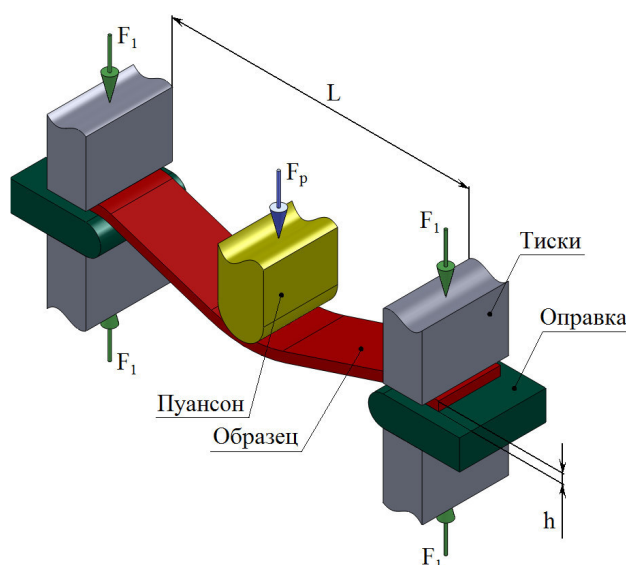


Рис. 1. – Схема испытаний образцов на изгиб

Закрепление исследуемых образцов осуществляется при помощи оправки и тисков. Материал оправки, тисков и пуансона: сталь Х12М по ГОСТ 5950-73. К тискам прикладывается поджимающая сила F_1 , её уровень в ГОСТ 14019-2003 не регламентирован. Скорость нагружения образцов ≈ 1 мм/мин, в ходе исследований проводится измерение прогиба исследуемых образцов.

Для проведения экспериментальных исследований на ползучесть была разработана оснастка. Общий вид разработанной испытательной оснастки представлен на рисунке 2.

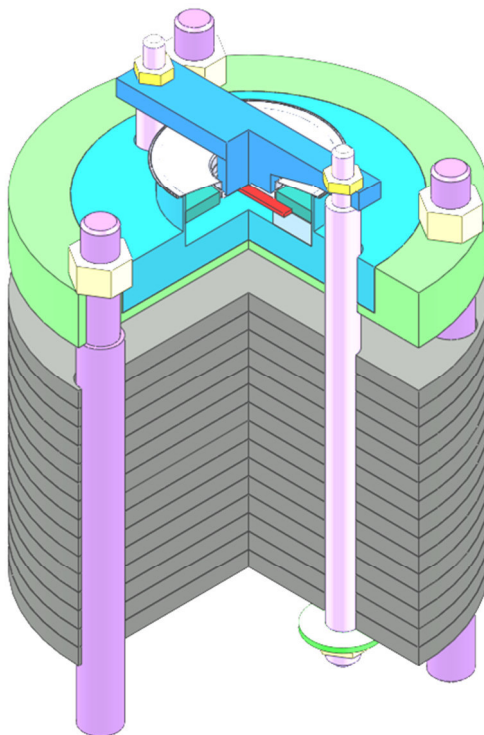


Рис. 2. – Общий вид испытательной оснастки

Конструкция испытательной оснастки реализует нагружение статической силой исследуемый образец из инертного материала. Уровень нагрузки воздействующей на образец определяется массой груза, входящего в состав оснастки. Нагружение образца осуществляется с помощью пуансона. Конструкция пуансона позволяет передавать нагрузку от составного груза к образцу. Передача усилия осуществляется с помощью резьбовых шпилек, вкрученных в тело пуансона, и опоры грузов.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИНЕРТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗГИБ И ПОЛЗУЧЕСТЬ

Численные расчеты на образцах из инертных материалов проведем в последовательности, аналогичной опытам:

- расчет на изгиб образца по определению уровня нагрузки F_p , при которой достигается предельное значение деформаций в исследуемом образце (для выбора уровней нагружения при расчетах на ползучесть);
- расчеты на ползучесть при постоянном усилии на образец в интервале значений $0,3F_p - 0,5F_p$ с выдержкой по времени.

По результатам численных расчетов построим зависимости изменения прогиба образцов, нагруженных постоянной силой, от времени проведения испытания, а также

зависимости изменения деформации во времени.

Численный расчет проведен по программе конечно-элементного анализа в нелинейной упругопластической постановке с использованием двухмерной симметричной модели. Расчетная симметричная конечно-элементная модель схемы нагружения образцов из инертных материалов на изгиб и ползучесть представлена на рисунке 3.

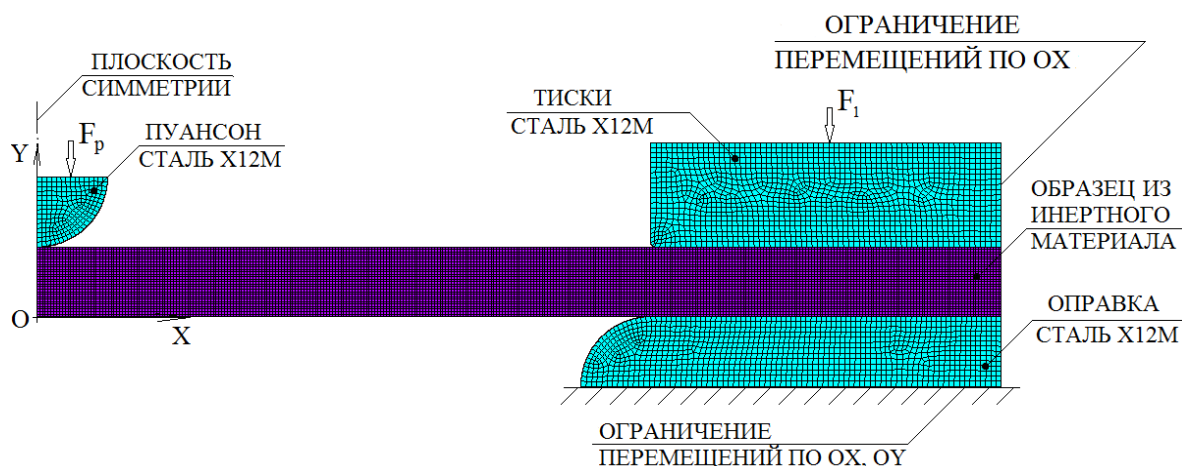


Рис. 3. – Конечно-элементная модель исследуемых образцов

На узлы, попадающие в плоскость симметрии, накладывались соответствующие ограничения по перемещениям по оси ОХ. Узлы, лежащие в основании оправки, жестко закреплены во всех направлениях. На узлы, лежащие на торце оснастки, накладывались соответствующие ограничения по перемещениям по оси ОХ.

Взаимодействие между элементами сборки «образец – оснастка» и «образец – пуансон» задавалось контактными элементами. Коэффициент трения для контактирующих деталей задавался равным 0,3 [2]. В численных расчетах осевое усилие F_p равномерно приложено к верхней плоской поверхности пуансона. Принятые в расчетах физико-механические свойства материалов [3,4] представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические свойства материалов

Материал	Медь М1	Сплав Д16	Сталь Х12М
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	330	447	–
Предел прочности при растяжении σ_b^p , МПа	350	560	–
Модуль упругости E , МПа	$1,17 \times 10^5$	$0,72 \times 10^5$	$2,02 \times 10^5$
Относительное удлинение при растяжении δ , %	13	8,5	–
Модуль упрочнения E' , МПа	153,6	1305,3	–
Коэффициент Пуассона μ	0,35	0,3	0,28

В работе [4] проведены исследования ползучести материалов (меди М1 и сплава Д16) при комнатной температуре и уровнях нагружения соответствующих (0,7 – 1,1) $\sigma_{0,2}$.

В таблице 2 представлены экспериментальные значения скорости ползучести для исследованных материалов в зависимости от напряжения.

Таблица 2. – Экспериментальные данные характеристик ползучести материалов

Медь М1 ГОСТ 859-2001	σ , МПа	400	410	480	500	570
	ζ , с ⁻¹	$2,78 \times 10^{-6}$	$5,56 \times 10^{-6}$	$1,02 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$
Сплав Д16 ГОСТ 4784-97	σ , МПа	300	325	340	360	380
	ζ , с ⁻¹	$6,11 \times 10^{-6}$	$8,88 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-5}$	$1,63 \times 10^{-5}$

В таблице 2 обозначено:

σ – действующее напряжение в материале образца, МПа;

ζ – скорость ползучести материала, с⁻¹

Проведена аппроксимация данных таблицы 2 и построены зависимости скорости ползучести материалов от напряжения.

На рисунке 4 представлена полученная степенная зависимость скорости ползучести от напряжения для меди М1 ГОСТ 859-2001.

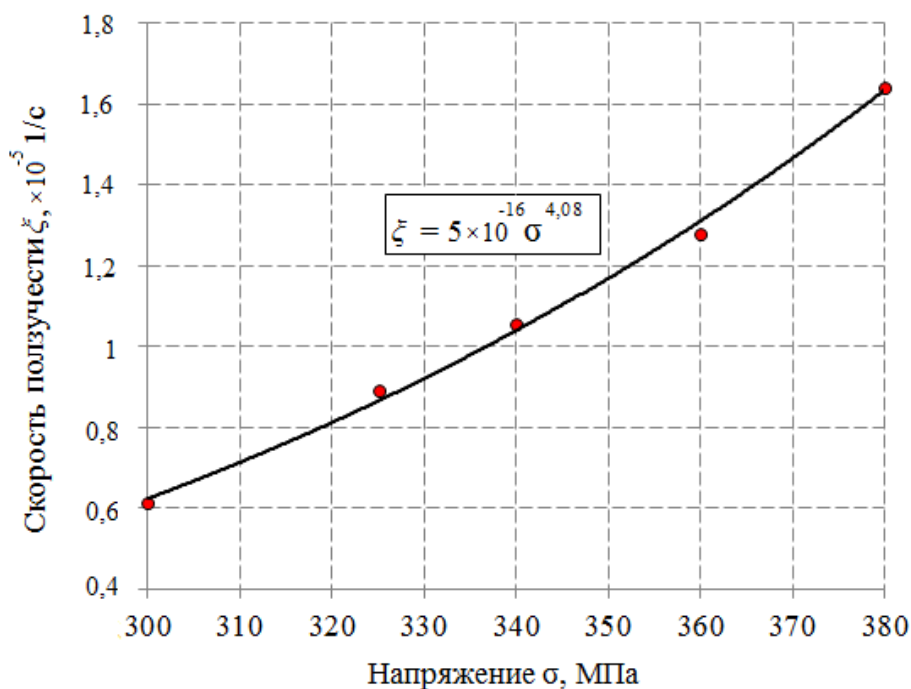


Рис. 4. – Зависимость скорости ползучести от напряжения для меди М1

На рисунке 5 представлена степенная зависимость скорости ползучести от напряжения для сплава Д16 ГОСТ 4784-97.

В численных расчетах на ползучесть используются физико-механические свойства материалов, представленные в таблице 1 и степенные законы ползучести для каждого исследуемого материала соответственно (рисунки 4, 5).

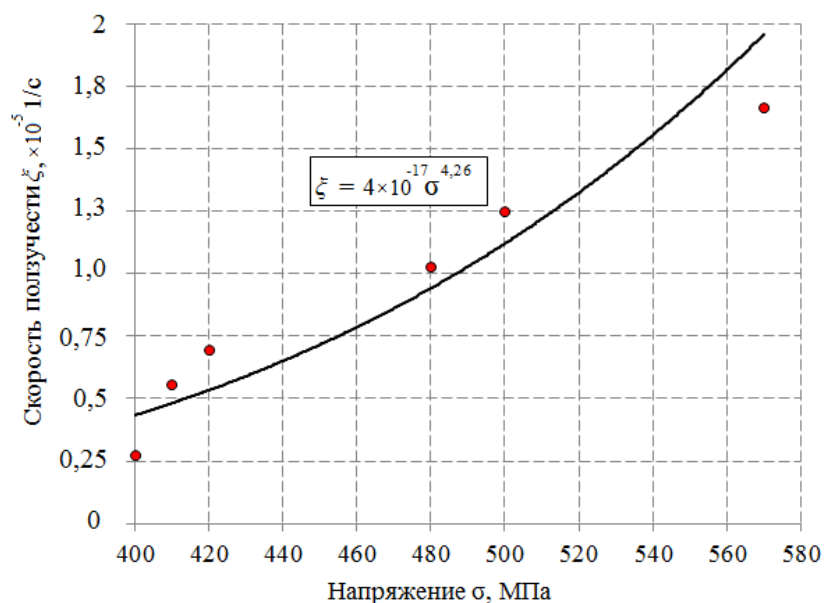


Рис. 5. – Зависимость скорости ползучести от напряжения для сплава Д16

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения критической нагрузки F_p проведены численные исследования образцов из инертных материалов на изгиб при комнатной температуре T_k . В расчетах в качестве критерия прочности образцов принималось достижение деформациями предельного значения, равного относительному удлинению материала в испытаниях на растяжение [5].

На рисунке 6 представлен характер распределения напряжений и деформаций в образце из меди М1 при нагружении силой F_p . Результаты приведены на момент действия нагрузки, при которой достигается предельное значение деформаций в исследуемом образце.

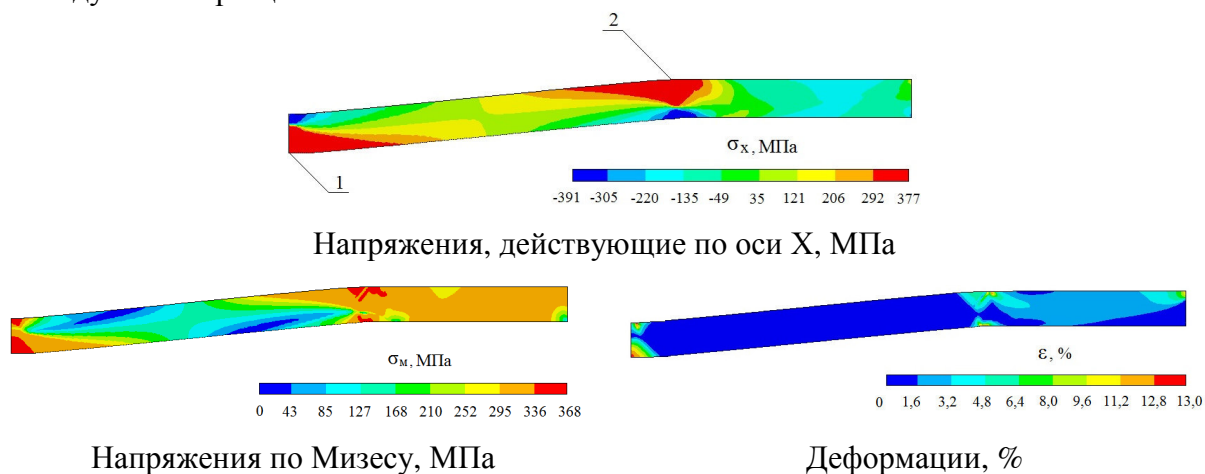


Рис. 6. – Распределения напряжений и деформаций в образце из меди М1

При нагружении образца из сплава Д16 реализуется аналогичный вид напряженно-деформированного состояния, отличие заключается в уровнях напряжений и деформаций.

В таблице 3 представлены результаты расчетов НДС для точек 1 и 2 исследуемых образцов.

Таблица 3. – Результаты численных расчетов образцов на изгиб

Параметр	Материал	Медь М1 ГОСТ 859-2001	Сплав Д16 ГОСТ 4784-97
Прогиб h , мм	точка 1	1,78	1,67
	точка 2	–	–
Деформации ε , %	точка 1	13,0	8,5
	точка 2	11,2	6,8
Максимальные напряжения, действующие по оси X σ_x , МПа	точка 1	377,0	644,0
	точка 2	351,0	587,0
Максимальные напряжения по Мизесу σ_m , МПа	точка 1	368,0	565,0
	точка 2	345,0	525,0

Как видно из рисунка 4 максимальные напряжения и деформации при нагружении образца из меди М1 локализуются на нижней поверхности образца под пуансоном и в области заделки (точки 1 и 2 соответственно).

Из анализа численных результатов представленных в таблице 3, следует, что больший уровень напряжений на 7 % и деформаций на 16 % реализуется в точке 1 по сравнению с точкой 2.

На рисунке 7 приведены графики зависимости деформаций в точке 1 исследуемых образцов от уровня приложенной нагрузки при исследованиях на изгиб.

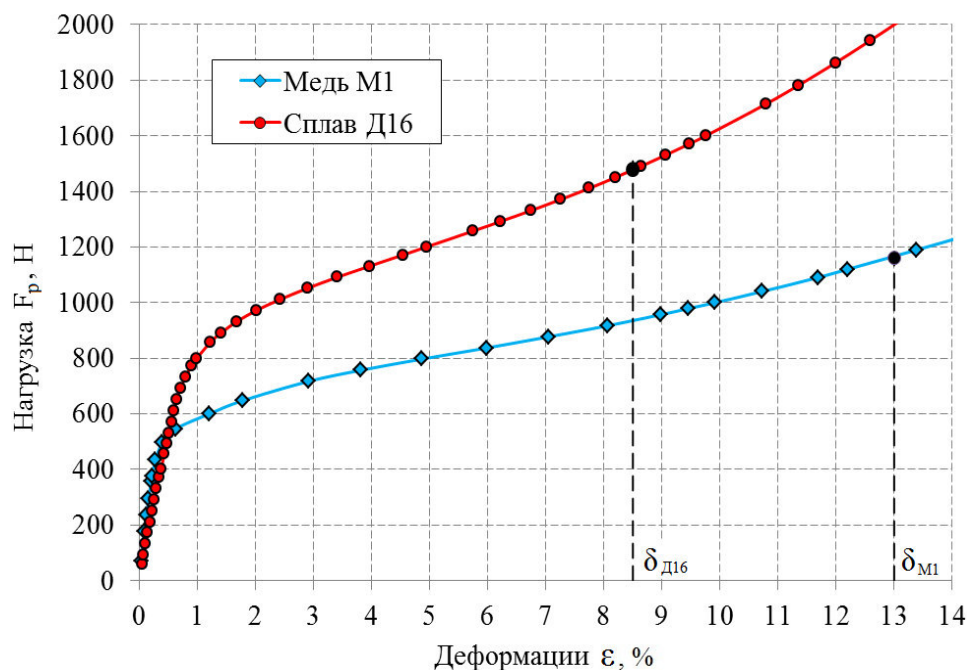


Рис. 7. – Графики зависимости деформаций от приложенной нагрузки

На рисунке 8 приведены графики зависимости реализованных прогибов исследуемых образцов в точке 1 от уровня приложенной нагрузки.

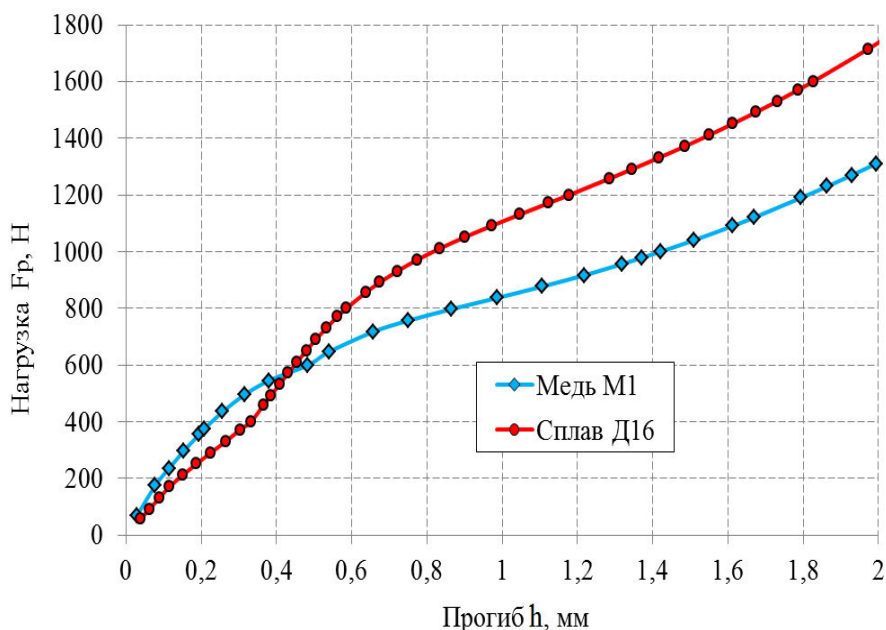


Рис. 8. – Графики зависимости прогиба образцов от приложенной нагрузки

Численные расчеты показывают, что достижение уровня предельной деформации в точке 1 в образце из меди М1 происходит при нагрузке $F_p \approx 1200$ Н, в образце из сплава Д16 $F_p \approx 1500$ Н. Проведенные численные расчеты дают предварительную оценку величин прогибов и НДС, реализующихся в исследуемых образцах во всем диапазоне изменения усилий вплоть до критических нагрузок.

Напряженно-деформированное состояние образцов при исследовании на ползучесть рассматривалось при комнатной температуре T_k и уровнях нагрузки $0,3F_p - 0,5F_p$ с выдержкой по времени в течение 96 часов. Расчетная схема аналогична использованной в расчете образцов из инертного материала на статический изгиб.

На рисунке 9 показаны распределения напряжений и деформаций ползучести в образце из меди М1 для уровня нагружения $0,5F_p$ (600 Н) с выдержкой в течение 96 часов при комнатной температуре.

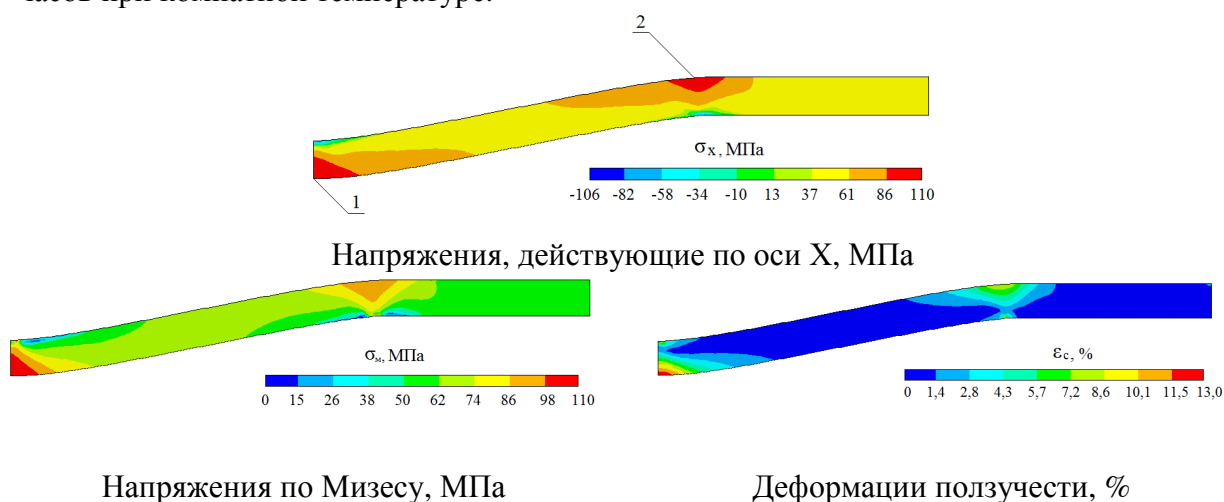


Рис. 9. – Распределения напряжений и деформаций ползучести в образце из меди М1

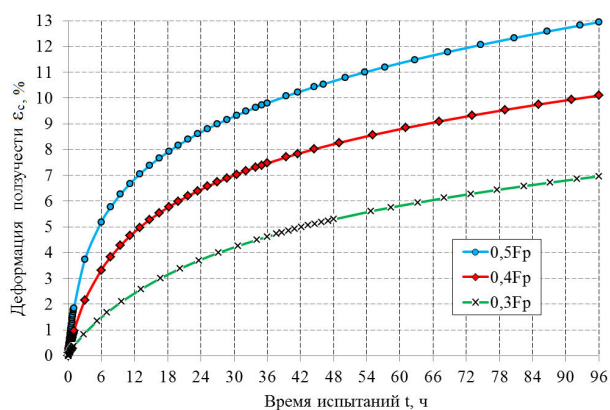
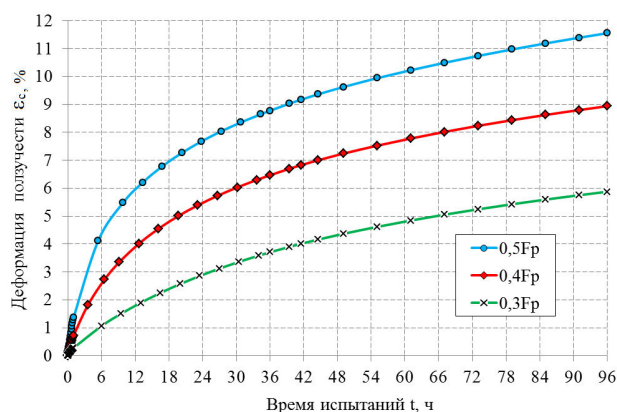
В таблице 4 представлены данные по расчетным параметрам, полученные в точках 1 и 2 образца для разных уровней нагрузки.

Таблица 4. – Результаты численных расчетов образцов на ползучесть

Параметр	Материал	Медь М1 ГОСТ 859-2001			Сплав Д16 ГОСТ 4784-97		
		Нагрузка	0,3F _p	0,4F _p	0,5F _p	0,3F _p	0,4F _p
Прогиб h, мм	точка 1	2,0	2,7	3,3	1,7	2,4	2,9
	точка 2	–	–	–	–	–	–
Деформация ползучести ε _c , %	точка 1	7,0	10,0	13,0	6,0	9,0	11,5
	точка 2	5,0	6,8	8,5	4,5	6,4	7,8
Максимальные напряжения, действующие по оси X σ _x , МПа	точка 1	100	103	110	148	152	157
	точка 2	85	88	94	132	134	135
Максимальные напряжения по Мизесу σ _m , МПа	точка 1	102	105	112	150	156	171
	точка 2	88	90	100	135	136	140

Как видно из рисунка 9, максимальные напряжения и деформации ползучести в образце из меди М1 локализуются на нижней поверхности образца под пуансоном и в области заделки (точки 1 и 2 соответственно). При различных уровнях прикладываемой нагрузки (от 0,3F_p до 0,5F_p) у разных исследуемых материалов (медь М1 и сплав Д16) характер распределения напряжений и деформаций ползучести существенно не меняется, изменился только их уровень. Результаты, представленные в таблице 4, свидетельствуют, что больший уровень напряжений (на ≈14 %) и деформаций ползучести (на ≈ 30 %) реализуется в точке 1 по сравнению с точкой 2.

На рисунках 10, 11 приведены графики зависимости деформации ползучести, реализованной в исследуемых образцах в точке 1 (см. рисунок 9) от времени проведения испытаний при различных уровнях нагружения.

**Рис. 10.** – Деформация ползучести образца из меди М1**Рис. 11.** – Деформация ползучести образца из сплава Д16

На рисунках 12, 13 представлены графики зависимости прогибов в образцах в точке 1 (см. рисунок 9) от времени проведения испытания при различных уровнях нагружения.

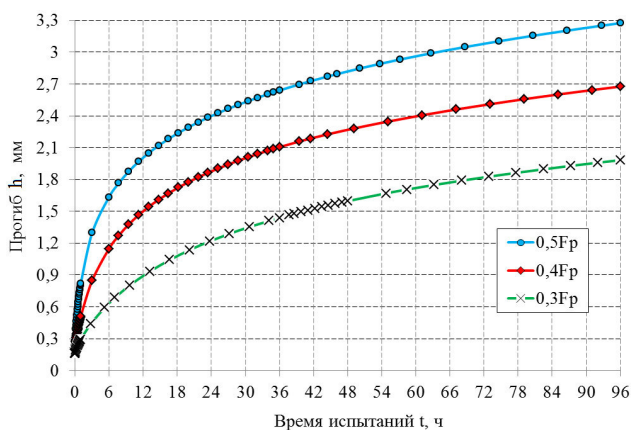


Рис. 12. – Прогибы образца из меди М1

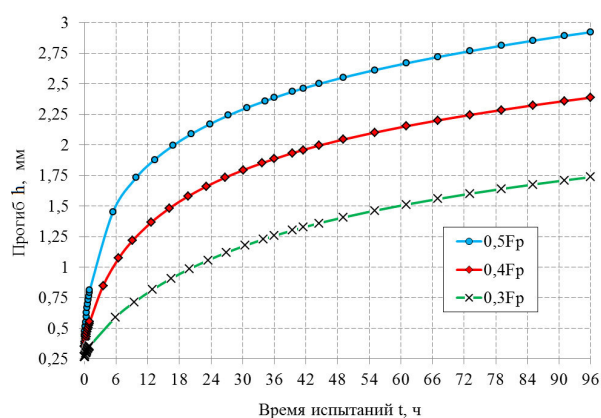


Рис. 13. – Прогибы образца из сплава Д16

Прогибы образцов из меди М1 и сплава Д16 при действующем усилии в течение 96 часов равным значению $0,3F_p - 0,5F_p$, составляют: для меди М1 от 2,0 до 3,3 мм, для сплава Д16 – от 1,7 до 2,9 мм соответственно. Деформации ползучести на нижней поверхности образца под пуансоном (в точке 1) не превысят 13%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные расчеты образцов из инертных материалов на ползучесть показали, что изменение уровня нагрузки на 20 % влияет на скорость ползучести материала. Максимальные значения напряжений и деформаций локализуются на нижней поверхности исследуемого образца под пуансоном. Вид распределения деформаций и напряжений при различных уровнях прикладываемой нагрузки (от $0,3F_p$ до $0,5F_p$) у разных исследуемых материалов (медь М1 и сплав Д16) существенно не изменяется, то есть области локализации максимальных деформаций и напряжений в исследуемых образцах не сместились, изменился только их уровень.

Проведенные численные расчеты на образцах из инертных материалов дают ожидаемые уровни нагрузок при исследованиях на ползучесть при длительном нагружении и на изгиб при кратковременном нагружении, величины перемещений, деформаций и времени проведения испытаний в экспериментах. В дальнейшем будут рассмотрены другие материалы и, в соответствии с требованиями МАГАТЭ, диапазоны эксплуатационных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14019-2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб [Текст]. – [Б.м.], 2003.
2. Крагельский, И.В. и др. Коэффициенты трения. Справочное пособие [Текст] / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. Издание второе. – М.: «Машгиз» 1962. – 112 с.
3. Брострема, В.А. и др. Справочник металлста [Текст] / В.А. Брострема, А.Г. Рахштадта. Справочное пособие. – М.: «Машиностроение», 1976. – 720 с.
4. Савва, С.П. Ползучесть некоторых конструкционных материалов при низких температурах [Текст] // Проблемы прочности. – 1975. – №7. – С. 41–44.
5. Гольденблат, И.И. и др. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов [Текст] / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. Справочное пособие. – М.: «Машиностроение», 1968. – 192 с.

REFERENCES

- [1] GOST 14019-2003. Materialy metallicheskie. Metod ispytaniya na izgib [SS 14019-2003. Materials metal. A test method on a bend]. Bez mesta [Without place], 2003. (in Russian)

- [2] Kragelskij I.V., Vinogradova. I.E. Koefficienty treniya [Friction coefficients]. Spravochnoe posobie [Handbook]. Izdanie vtoroe [2nd Edition]. M. Pub. «Mashgiz», 1962, ISBN 978-5-458-42106-5, 112 p. (in Russian)
- [3] Brostrema V.A., Raxshtadta A.G. Spravochnik metallista [Reference book of the metalworker]. Spravochnoe posobie [Handbook]. M. Pub. «Mashinostroenie» [mechanical engineering], 1976, 720 p. (in Russian)
- [4] Savva S.P. Polzuchest nekotoryh konstrukcionnyh materialov pri nizkih temperaturah [Creep of some constructional materials at low temperatures]. Problemy prochnosti [Strength of Materials]. 1975, №7, ISSN 0556-171X, pp. 41–44. (in Russian)
- [5] Goldenblat I.I., Kopnov V.A. Kriterii prochnosti i plastichnosti konstrukcionnyh materialov [Criteria of durability and plasticity of constructional materials]. Spravochnoe posobie [Handbook]. M. Pub. «Mashinostroenie» [mechanical engineering], 1968, 192 p. (in Russian)

Creep Material Research in Operating Conditions of Special Structures

D.S. Goriushkin*, Y.S. Zyeв, A.V. Staheev**

Snezhinsk Physics and Technical Institute the Branch of National Nuclear Research University MEPHI

8 Komsomolsk st., Snezhinsk city, Cheliabinsk reg., Russia 456776

**email: goruh@bk.ru, ** email: YSZuyev@mephi.ru*

Abstract – The method of the knowledge-intensive product calculation at static mechanical loading action at the indoor temperatures is offered. The carried-out numerical calculations on from inert material samples give preliminary estimates of deflection size and creep deformations in structures. Verification of the offered technique will be made on the given experiment basis on inert material samples. The authors consider the possibility of transferring results of numerical calculations in scale models.

Keywords: critical loads, inert materials, displacement, creep deformations, final and element model, experimental justification