ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Մեխանիկա XXII, № 6, 1969 Механика

А. М. СИМОНЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ Х18Н10Т ПРИ 600° С

Исследуется временная связь между деформациями и напряжениями при 600° С у хромоникелиевой стали Х18Н10Т в условиях постоянных и переменных растягивающих нагрузок с продолжительностью опыта от 200 до 800 часов. Для выявления специфических особенностей ползучести при переменных нагрузках, как это рекомендуется в [1], нагрузки взяты ступенчатыми (до 6 ступеней).

Исследуемая сталь при 20° С имеет нижеследующие механические характеристики: предельное сопротивление разрыву $R = 62$ *кг/мм*^{2}; предел текучести 32.2 *кг/мм*^{2}; удлинение до разрушения — 50% при скорости деформации 0.05 *1/мин*, 41% — при 0.17 *1/мин*.

1. Методика исследования

Опыты произведены на испытательных машинах типа *Zst* 502.10 Рауэнштайн (ГДР), в камерах которых поддерживалась температура 600° С, периодически колеблющаяся в пределах ± 2° С. Как показано в [2], колебания эти практически не влияют на деформации ползучести, хотя отражаются на отчетах деформаций, вследствие чего последние брались в моменты очередных автоматических включений печи.

Нагрузка на цилиндрический образец передается посредством навинченных на него зажимов с помощью штучных грузов, подвешенных к нижнему зажиму через двухступенчатое рычажное устройство с передаточным числом 1:50. Взаимное положение двух измерительных шин, жестко закрепленных соответственно на двух выступах образца, указывается на выносном экране и читается с помощью спирального микроскопа с ценой деления 1 *микрон*. База измерения деформаций — 100 *мм*.

Выточка образцов 8 *мм* из прутков 15 *мм* осуществлялась при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность, что препятствовало возникновению местных температурных градиентов, могущих привести к возникновению остаточных напряжений и к структурным изменениям.

Испытывались на ползучесть лишь образцы, дающие равную деформацию с двух противоположных сторон при пробных нагружениях. Образцы не подвергались предварительной термической обработке и нагревались до 600° С плавно в течение 3 *часов* и при полном отсутствии нагрузок.

Нагружение осуществлялось путем подъема системы зажимов с подвешенными штучными грузами со специального упора. Ступенчатое изменение нагрузок в процессе опыта осуществлялось вручную.

2. *Ползучесть при постоянных нагрузках*

Испытания, проведенные при напряжениях 0.1 R, 0.15 R, 0.2 R, 0.25 R и 0.3 R, показали, что почти у всех образцов, начиная с некоторого момента (~ 48 *часов*), контрастно выявляется течение с постоянной скоростью. Аппроксимация ползучести по какой-либо формуле, предусматривающей затухание ползучести, для исследуемого материала приводит к расхождению с опытными данными, которое растет со временем. Таким образом, принимается форма аналитического представления ползучести, впервые предложенная Эндрейдом [3], с той лишь разницей, что здесь затухающая часть аппроксимирована экспоненциальной функцией [10].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(\sigma) + \alpha(\sigma)t + \beta(\sigma)(1 - e^{-\gamma t}) \tag{2.1}$$

где

$$\varepsilon_0(\sigma) = 32\left(\frac{10\,\sigma}{R}\right)^{1.5} \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha(\sigma) = 0.8\left(\frac{10\,\sigma}{R}\right)^{3.5} \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{\text{сутки}} \tag{2.2}$$

$$\beta(\sigma) = 6.0\left(\frac{10\,\sigma}{R}\right)^{2.4} \cdot 10^{-5}$$

$$\gamma = \frac{1}{16}\ \frac{1}{\text{сутки}}$$

Параметры (2.2) верны при $\sigma \leq 0.25R$.

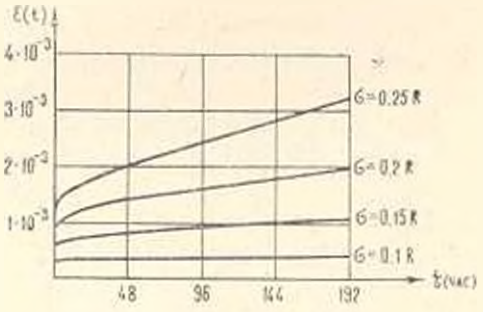
Здесь и в дальнейшем будем рассматривать полные деформации, так как, во-первых, разделение деформаций ползучести и пластичности всегда условно, а во-вторых, мгновенные деформации, как, впрочем, будет показано ниже, при изменении нагрузки существенно зависят от протекшей ползучести.

На фиг. 1 показаны кривые, вычисленные по формуле (2.1).

Для того, чтобы наглядно показать близость экспериментальных и теоретических кривых, представляется удобным ввести коэффициент абсолютной вариации

$$\delta(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \int_0^t |\varepsilon(\tau) - \varepsilon_{si}(\tau)|\, d\tau}{n \int_0^t \varepsilon(\tau)\, d\tau} \tag{2.3}$$

где $\varepsilon_{si}(\tau)$ — i-я экспериментальная деформация в момент τ, n — количество экспериментов.



Фиг. 1.

При $t = 200$ *час* для δ получены значения, приведенные в табл. 1, из которой видно, что относительный разброс экспериментальных данных практически не зависит от нагрузки.

Таблица 1

σ/R	0.1	0.15	0.2	0.25
$\delta(\tau)$	0.094	0.088	0.091	0.102

3. Ползучесть при ступенчато-изменяющихся нагрузках

При рассмотрении ползучести при переменных нагрузках возникает вопрос о выборе той или иной теории ползучести, обобщающей зависимость (2.1).

Отметим, что основная формула теории упрочнения

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \psi(\varepsilon_{pl}) = f(\sigma) \tag{3.1}$$

при различных постоянных нагрузках предусматривает подобие кривых в системе $\left(\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t}, \varepsilon_{pl}\right)$. В связи с этим наступление фазы с постоянной скоростью ползучести должно быть при достижении одной и той же пластической деформации. В настоящих же экспериментах подобия

этих кривых нет, а фаза ползучести с постоянной скоростью достигается по истечении одного и того же времени и при различных пластических деформациях, что противоречит (3.1).

Если же затухающую часть деформации $\beta(\sigma)(1-e^{-\gamma t})$ отнести к мгновенной и, кроме того, положить $\varepsilon_{0\sigma}=\varepsilon_c$, то соотношение (3.1) вырождается в уравнение теории течения.

Обобщая (2.1) при использовании наследственной теории (отметим, что обобщение это могло быть и иным), получим

$$\varepsilon(t)=\varepsilon_0(\sigma(t))+\int_0^t\left|\alpha(\sigma(\tau))+\gamma\beta(\sigma(\tau))e^{-\gamma(t-\tau)}\right|d\tau \qquad (3.2)$$

Соотношение (3.2) представляет собой уравнение нелинейной наследственности с двумя наследственными членами, ядро одного из которых вырождено $K_1(t,\tau)=1$, так что обратимой частью деформаций ползучести будет $\beta(\sigma)$. Аппроксимация деформаций ползучести с помощью двух наследственных членов использовалась и для бетона [4], [9], и при изучении сдвиговых процессов у глинистых грунтов [8].

Характерно, что кривая, построенная согласно (3.2), асимптотически будет стремиться к кривой ползучести теории течения, если в последней за мгновенную часть принять $\varepsilon_0(\sigma(t))+\beta(\sigma(t))$. Несомненным недостатком (3.2) является обратимость мгновенной деформации.

При ступенчато изменяющихся нагрузках формула (3.2) запишется так

$$\varepsilon(t_n)=\varepsilon_0(\sigma_n)+\sum_{i=1}^{n}\alpha(\sigma_i)(t_i-t_{i-1})+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\beta(\sigma_i)\left|e^{-\gamma(t_n-t_{i-1})}-e^{-\gamma(t_n-t_i)}\right| \qquad (3.3)$$

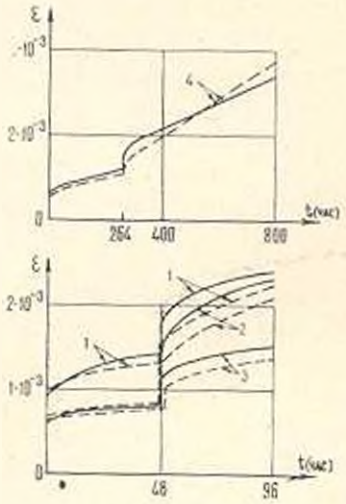
где t_n — текущий момент, $t_0=0$, t_i-t_{i-1} — продолжительность действия нагрузки σ_i.

Формула (3.2), равно как и (3.3), соответствует схеме сопротивления, представленной на фиг. 2. Здесь пружина 1 нелинейно-деформируема и соответствует $\varepsilon_0(\sigma)$, элемент 2 соответствует необратимому течению $\alpha(\sigma)$, а элементы 3 и 4 совместно определяют затухающую и обратимую деформацию $\beta(\sigma)$.

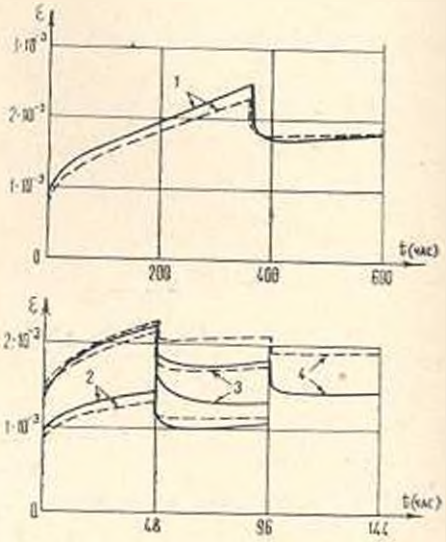
Фиг. 2.

Ниже будут приведены экспериментальные данные ползучести при различных видах изменения нагрузок. На фиг. 3—10 изображены пунктиром экспериментальные кривые и сплошными линиями — теоретические. Экспериментальные кривые соответствуют усредненным данным из нескольких (2—3) опытов при переменной нагрузке. Теоретические же построены на основе усредненных экспериментальных данных (2.2)

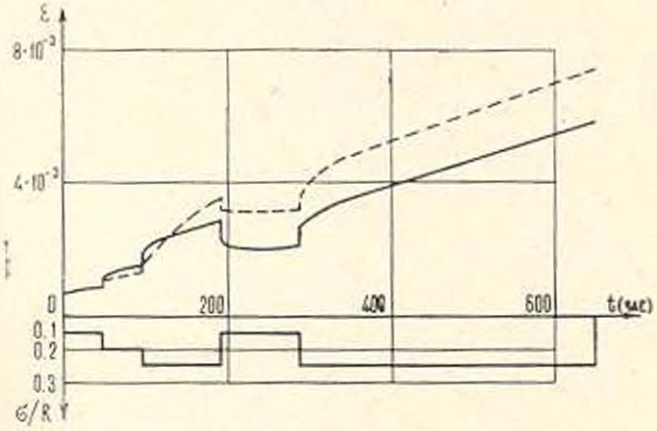
при постоянных нагрузках (8—10 опытов). Естественно, что, вследствие разброса экспериментальных данных, кривые эти на первой ступени нагружения не совпадают.



Фиг. 3.



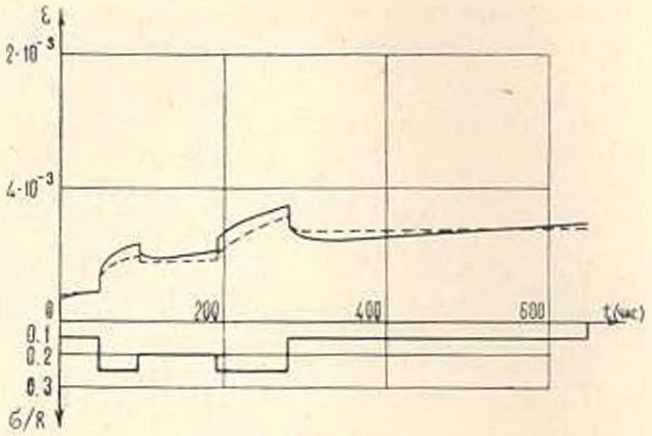
Фиг. 4.



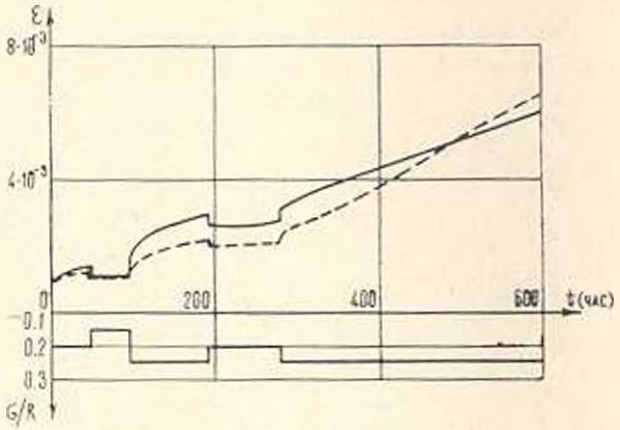
Фиг. 5.

а) Случай возрастания нагрузки ($\sigma_1 < \sigma_2$)

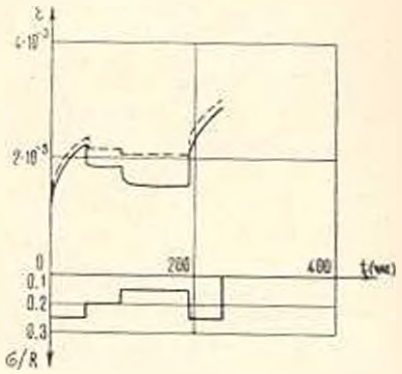
Основными параметрами эксперимента здесь являются: отношение $k = \sigma_1/\sigma_2$, напряжение σ_2 и продолжительность t_1 и t_2 ступеней загрузки. При крайних значениях $k = 0$ или $k = 1$ экспериментальные кривые тривиально совпадают с теоретическими. Это совпадение почти сохраняется и при малых k и малых t_1, когда ползучесть при σ_1 несущественна. В связи с этим выбраны $k > 0.5$ и $t_1 > 48$ *час*, когда превалирующая часть затухающей ползучести успевает проявиться.



Фиг. 6.



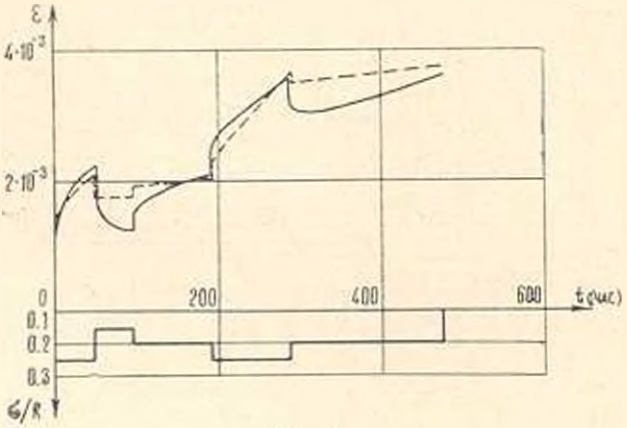
Фиг. 7.



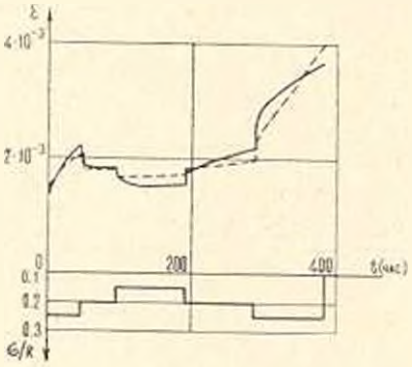
Фиг 8

В табл. 2 даны параметры проведенных экспериментов.

Из экспериментальных данных (фиг. 3) видно, что ступенчатое увеличение нагрузки в процессе ползучести приводит к меньшему



Фиг. 9.



Фиг. 10.

мгновенному росту деформаций, чем это предсказывается теорией (для всех выбранных нагрузок примерно в 1.5 раза), причем это не зависит от времени протекания ползучести в пределах 48—264 *час*.

Таблица 2

Номер эксперимента	k	τ_2	t_1 (час)	t_2 (час)
1	0.8	0.25	48	18
2	0.6	0.25	48	18
3	0.75	0.2	48	18
4	0.75	0.2	263	450

Форма кривой ползучести, то есть наличие затухающей и установившейся фаз и постоянство коэффициента γ оказываются в хорошем соответствии с теоретическими предсказаниями. При этом, однако, затухающая часть ползучести (β) оказывается меньше, а скорость течения (α) — больше, чем это предсказывается теоретически. Благодаря этому экспериментальная и теоретическая кривые сближаются со временем и пересекаются, как и получено при длительных испытаниях.

Если исключить мгновенные деформации и рассматривать отдельно деформации ползучести, то мы получим, что повышение нагрузки приводит к более интенсивной ползучести, чем показывает это наследственная теория, как это и указывалось в применении к сплаву Д-16 в работе [5].

б) Случай убывания нагрузки ($\sigma_1 > \sigma_2$)

В этом случае имеет место так называемое „обратное последействие", которое может быть описано лишь наследственной теорией. Однако, при этом всегда мы имеем значительно большее падение деформаций, чем это имеет место на самом деле [6]. То обстоятельство, что в формуле (3.2) одно из ядер ползучести (при γ) вырождено и приводит к необратимости соответственно деформации $\int_0^t \alpha(\tau)\,d\tau$, несколько сглаживает это расхождение.

Эксперименты проведены при нижеследующих параметрах.

Таблица 3

Серия эксперимента	$\frac{\sigma_1}{R}$	t_1 (час)	$\frac{\sigma_2}{R}$	t_2 (час)	$\frac{\sigma_3}{R}$	t_3 (час)
1	0.2	360	0.1	264	—	—
2	0.2	48	0.15	48	—	—
3	0.25	48	0.15	48	—	—
4	0.25	48	0.2	48	0.15	48

Экспериментальные данные (фиг. 4) показывают, что ступенчатое уменьшение нагрузки приводит к меньшим отрицательным мгновенным деформациям, чем это предсказывается теорией, приблизительно в 1.5 раза.

Ползучесть после уменьшения нагрузки во всех случаях очень мала, и это не зависит от того, насколько нагрузка уменьшена. Форма экспериментальной кривой, в общем, аналогична теоретической и лишь точка минимума деформаций у нее соответствует 6—9 *час* после изменения нагрузки, в то время как у теоретической кривой она

существеннее зависит от степени разгрузки и смещена вправо. Скорость течения у образцов оказывается меньше предсказываемой теоретически.

в) Случай многоступенчатых нагрузок

Исследование ползучести при многоступенчатых нагрузках проведено при малопродолжительных первых ступенях ползучести с относительно длительной последней ступенью. С одной стороны, это позволяет изучить форму кривой ползучести при частых изменениях нагрузок, с другой стороны, — изучить влияние этих нагружений на ползучесть при последней постоянной нагрузке.

Эксперименты проведены при параметрах, указанных в табл. 4.

Таблица 4

Номер эксперимента	$\frac{\sigma_1}{R_1}$	$\frac{\sigma_2}{R_2}$	$\frac{\sigma_3}{R_3}$	$\frac{\sigma_4}{R_4}$	$\frac{\sigma_5}{R_5}$	$\lambda\,(t_k)$
1	0.15 48	0.2 48	0.25 96	0.15 96	0.25 336	0.250
2	0.15 48	0.25 48	0.2 96	0.25 96	0.15 336	0.085
3	0.2 48	0.15 48	0.25 96	0.2 96	0.25 336	0.114
4	0.25 48	0.2 48	0.15 96	0.25 24	—	0.263
5	0.25 48	0.15 48	0.2 96	0.25 96	0.2 188	0.079
6	0.25 48	0.2 48	0.15 96	0.2 96	0.25 48	0.081

Кривые ползучести представлены на фиг. 5.

Проведенные эксперименты позволяют проверить принцип коммутативности Одквиста [7], согласно которому деформации ползучести в текущий момент не зависят от очередности приложения нагрузок при равной продолжительности действия каждой из них.

Для следования этому принципу деформации при $t = 144$ *час*, описываемые кривыми на фиг. 5—10, должны отличаться на разницу соответственных мгновенных деформаций, что, вообще говоря, в настоящих экспериментах не имело места. Формула (3.3) с некоторой приближенностью описывает принцип коммутативности, если только нагрузки на последних ступенях равны друг другу. Приближенность здесь связана с тем, насколько исчерпана к рассматриваемому моменту затухающая часть ползучести, и при ступенях по 48 *час* можно, очевидно, говорить о практической точности.

При попарном сравнении экспериментальных кривых на фиг. 5 и 7, 6 и 9 получено, что если напряжение σ_5 на последней ступени

превышает напряжения σ_1 и σ_2 на предыдущих двух ступенях (фиг. 5 и 7), то наибольшая деформация будет при постепенном повышении напряжения, т. е. при $\sigma_1 < \sigma_2$; если же напряжение σ_3 является средним по сравнению с σ_1 и σ_2 (фиг. 6 и 9), то принцип Одквиста соблюдается очень точно.

Для каждого вида эксперимента в табл. 4 подсчитаны коэффициенты $\delta(t_k)$ по формуле

$$\delta(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k} \int_{t_{i-1}}^{t_i} |\varepsilon(\tau) - \varepsilon_э(\tau)|\, d\tau}{\sum_{i=1}^{k} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \varepsilon(\tau)\, d\tau} \tag{3.4}$$

где k — число ступеней, $\varepsilon_э(\tau)$ — деформация, определенная экспериментально, а $\varepsilon(\tau)$ — по формуле (3.3). $\delta(t_k)$ определяет отношение площади, заключенной между экспериментальной и теоретической кривыми в момент t_k, к площади, заключенной между теоретической кривой и осью абсцисс.

Как видно из табл. 1 и 4, расхождение экспериментальных данных при переменных нагрузках лишь немного больше разброса данных при постоянных нагрузках, причем теоретическая кривая, в общем, описывает явления, происходящие в материале при колебании напряжений.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 30 V 1969

Ա. Ա. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

ԶԱՆԳՈՏԱԿԱՅԻՆ X18H10T ՊՈՂՊԱՏԻ ՍՈՂՔԻ ԷՔՍՊԵՐԻՄԵՆՏԱԼ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ 600°C-Ի ԺԱՄԱՆԱԿ

Աշխատանքում հետազոտված է X18H10T պողպատի սողքը հաստատուն և փոփոխական լարումների դեպքում՝ անփոփոխ (600°) ջերմաստիճանի պայմաններում։ Ցույց է տրված, որ հաստատուն լարումների տակ առաջացած սողքը հեռանում է էքսպոնենտ ապրոքսիմացիայից, իսկ փոփոխական լարումների ժամանակ գրանցվում է ոչ-գծային ժառանգականության տեսության հավատարումները։

Ցույց է տրված նաև, որ Օդկվիստի սկզբունքը գոյություն ունի միայն այն դեպքում, երբ բեռնավորման վերջին աստիճանի լարումները համնման են։

A. M. SIMONIAN

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CREEP OF THE X18H10T UNRUSTED STEEL AT 600°C

Summary

In this paper the creep of X18H10T steel under unstable and constant tension at 600°C is investigated.

It is shown that the creep that takes place under stable tension follows Endreid's approximation, but under changing tension it is described by equations of non-linear theory of heredity.

It has also been shown that the principle of Odkvist exists only in that case when the last degrees of tension coincide.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. Наука, М., 1966.
2. *Наместников В. С.* О ползучести при переменной температуре в условиях сложного напряженного состояния. ПМТФ, № 4, 1964.
3. *Andrade E. N. da C.* On the viscous flow of metals and allied phenomena. Proc. Roy. Soc. (A), v. 84, № A 567, London, 1910.
4. *Карапетян К. С.* Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Изв. АН Арм.ССР, серия физ.-мат. наук, т. XII, № 4, 1959.
5. *Наместников В. С., Работнов Ю. Н.* О наследственных теориях ползучести. ПМТФ, № 4, 1961.
6. *Работнов Ю. Н.* О некоторых возможностях описания неустановившейся ползучести с приложением к исследованию ползучести роторов. Изв. АН СССР, ОТН, № 5, 1967.
7. *Одквист Ф.* Технические теории ползучести. Механика, сб. перев. и обз. ипериод. лит., № 2, 1959.
8. *Месчян С. Р.* Исследование ползучести глинистых грунтов при сдвиге. Изв. АН Арм.ССР, серия физ.-мат. наук, т. 17, № 6, 1964.
9. *Kennedy A. J.* On the generality of the cubic creep function. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. vol. 1, London, 1953.
10. *Гарофало Ф.* Законы ползучести и длительной прочности металлов. Металлургия, М., 1968.