

А. М. СИМОНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕТЬЕЙ СТАДИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ХРОМО-НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

Детали машин и энергетических установок, эксплуатируемых в условиях высоких температур, обычно находятся в нестационарном тепловом поле. Вследствие этого вопрос прогнозирования ползучести при нестационарных температурных режимах на основе аппроксимаций ползучести при строго постоянных температурах имеет актуальность.

В ряде экспериментальных исследований [1—4 и др.] показано, что факт циклических теплосмен приводит к ускоренной ползучести. Однако, в работе [5] показано, что для слабо упрочняющихся материалов уравнение теории течения дает вполне удовлетворительное предсказание ползучести при нестационарных температурных режимах и, следовательно, теплосмены не приводят к ускорению ползучести. Аналогичное утверждение делается и в работе [6], где показано, что скорость установившейся ползучести не зависит от истории изменения напряжения и температуры. В работе [7] было показано, что в случае очень медленных изменений температуры тонкостенных образцов колебания температуры не вызывают ускоренной ползучести, вследствие чего делается вывод, что причиной ускоренной ползучести при теплосменах является возникновение температурных напряжений. Итак, вероятно, можно считать, что в первых двух стадиях ползучести температурные колебания при незначительных возникающих температурных напряжениях не должны приводить к ускоренным деформациям ползучести.

Настоящая работа посвящена исследованию ползучести стали X18H10T при многоступенчатых изменениях температуры в третьей стадии, то есть в условиях, когда ускоренная ползучесть имеет место и без колебаний температуры.

1. О методике экспериментальных исследований

Испытания проводились на цилиндрических образцах с диаметром 8 мм из стали X18H10T. Образцы вытачивались при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность, что препятствовало возникновению местных температурных градиентов и остаточных напряжений. Эксперименты были проведены при температурах в диапазоне 680—720°C, при этом явление окалинообразования не учитывалось, так как, согласно [8], окалинообразование образцов из стали X18H10T с диаметром 8 мм может привести лишь к 0.06% уменьшения первоначальной площади поперечного сечения образцов.

Температура измерялась в непосредственной близости от поверхности образца и регулировалась путем периодического включения и выключения нагревательных устройств в печи, при этом имели место колебания от $\pm 2^\circ\text{C}$ с периодом около 2 мин. «Ступенчатое» изменение температуры осуществлялось с максимальной скоростью $\sim 4^\circ/\text{мин}$. Как известно [9], температурное поле $T(r, t)$ в длинном цилиндре с радиусом R при начальной постоянной температуре T_0 и при заданной скорости k изменения температуры поверхности определяется по формуле

$$T(r, t) = T_0 + k \left(t + \frac{R^2 - r^2}{4\chi} \right) + \frac{2k}{\alpha\chi} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha z_n^2 t} \frac{J_0(r z_n)}{z_n^3 J_1(R z_n)} \quad (1.1)$$

где χ — коэффициент тепловой диффузии, J_0 и J_1 — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, z_n — положительные корни трансцендентного уравнения $J_0(R z_n) = 0$. При установившемся тепловом потоке имеет место

$$T(r, t) = T_0 + k \left(t + \frac{R^2 - r^2}{4\chi} \right) \quad (1.2)$$

Принимая, что в процессе изменения температуры действует упругий закон, получим следующее выражение для температурных напряжений

$$\sigma_r = \frac{E\chi k}{8\chi} (R^2 - 2r^2) \quad (1.3)$$

что для стали X18H10T при данных $E(700^\circ) = 1.5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$, $R = 4 \text{ см}$, $\alpha(700^\circ\text{C}) = 18.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $k = 4 \frac{\text{град}}{\text{мин}}$, $\chi = 0.054 \text{ см}^2/\text{сек}$ дает $\sigma_{r_{\text{min}}} = \sigma_r(r = R) = -92 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_{r_{\text{max}}} = \sigma_r(r = 0) = 92 \text{ кг/см}^2$. Это предельные значения температурных напряжений, которые могли возникнуть в образце лишь в течение 5–10 мин при изменении температуры и на порядок меньше прилагаемых к образцу растягивающих напряжений. Отметим, что при мгновенном изменении температуры поверхности на 20°C температурные напряжения могли достигнуть значения $\alpha \cdot 20^\circ\text{C} \cdot E = 560 \text{ кг/см}^2$.

Таким образом, при увеличении скорости изменения температуры k температурные напряжения, пропорционально зависящие от k , могут оказаться существенными и, кроме того, согласно принципу Онзагера [11], скорость изменения температуры влияет на реологические свойства материалов.

Поскольку, как показано в [10], основной причиной разброса экспериментальных данных является неточность температуры проведения эксперимента, температура у каждого испытуемого образца контролировалась с помощью одного и того же милливольтметра с учетом поправок на термопары.

2. О теоретических предпосылках

Как показано в работе [12], деформации ползучести $\varepsilon_c(t)$ стали X18Ni10T при постоянных напряжении и температуре аппроксимируются уравнением

$$\varepsilon_c(t) = \beta(1 - e^{-\alpha t}) + \alpha t + \varepsilon_{III}(t) \quad (2.1)$$

где первый член (β — ползучесть) представляет собой затухающие деформации ползучести, частично обратимые при разгрузке, αt — деформации ползучести с постоянной скоростью, $\varepsilon_{III}(t)$ — деформации ползучести с возрастающей скоростью, являющиеся причиной возникновения третьей стадии ползучести. В работе [13] показано, что в случае уменьшения температуры β -ползучесть не является обратимой и было предложено уравнение, учитывающее «замораживание» этой доли ползучести при уменьшении температуры, вырождающееся при отсутствии уменьшения температуры в обычное наследственное уравнение с экспоненциальным ядром. В условиях проведенных в настоящей работе экспериментов β -ползучесть была незначительной и завершалась уже в начальной стадии эксперимента, что облегчало ее учет. Скорость установившейся ползучести во второй стадии, аналогично [6], принята зависящей лишь от действующего напряжения $\sigma(t)$, независимо от истории нагружения. Деформации с возрастающей скоростью $\varepsilon_{III}(t)$, как показано в [12, 14], аппроксимируются выражением

$$\begin{aligned} \varepsilon_{III}(t) &= F(\sigma, T) t^3 \\ F(\sigma, 700^\circ\text{C}) &= k\sigma^{13.3} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Исследования деформации $\varepsilon_{III}(t)$ при 700°C и при одноступенчатых возрастаниях и убываниях во времени напряжений [14], а также при неравномерно-циклических приложениях напряжения, чередующихся с полной разгрузкой [12], и при неравномерно-циклических ступенчато-изменяющихся напряжениях [15] показали, что выражение (2.2) для случая переменных напряжений может быть обобщено в виде

$$\varepsilon_{III}(t) = 3k \int_0^t \sigma^\lambda(\tau) \left[\int_0^\tau \sigma^\nu(\xi) d\xi \right]^2 d\tau \quad (2.3)$$

где $\lambda = 10$, $\nu = 1.65$. Легко видеть, что при $\lambda = \nu = 4.4(3)$ выражение (2.3) является обобщением (2.2) согласно гипотезе уравнения состояния [16]. Существенным здесь является вытекающий из (2.3) и экспериментально подтвержденный в [12] факт о том, что при действии некоторого постоянного напряжения, чередующегося с полной разгрузкой (отдыхом), деформации ε_{III} (до 5—6%) определялись лишь продолжительностью нахождения образца под нагрузкой независимо от наличия, продолжительности отдыхов и равномерности циклов. Следует отметить, однако, что отсюда нельзя делать вывод о независимости долговечности стали от наличия отдыхов, поскольку, как показано в [17], нагружение, чередующееся с разгрузкой для той же стали лишь при несколько более низких температурах

сокращает срок службы, то есть, вообще говоря, достигнутые деформации ползучести не определяют однозначно вопрос о разрушении.

Для обобщения (2.2) на случай переменных температур, в случае подобия кривых ползучести $\varepsilon_{III}(t)$, естественным представляется операция, использованные в (2.3), применить не только к $\varepsilon^{13,3}(t)$, но и вообще к функции $F(\sigma, T)$; при этом получим

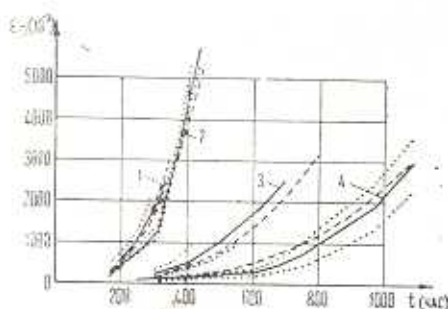
$$\varepsilon_{III}(t) = 3 \int_0^t F^{\frac{3}{\lambda+2\sigma}} [\sigma(\tau), T(\tau)] \left\{ \int_0^{\tau} F^{\frac{\lambda}{\lambda+2\sigma}} [\sigma(\xi), T(\xi)] d\xi \right\}^2 d\tau \quad (2.4)$$

3. Обсуждение экспериментальных данных

Эксперименты были проведены при напряжении 9.3 кг/мм^2 при 700°C и 720°C , при напряжении 11.15 кг/мм^2 при 680°C и 700°C , при напряжении 9.3 кг/мм^2 и согласно двум различным программам неравномерно-циклических ступенчатых изменений температуры от 700°C до 720°C и обратно, а также при напряжении 11.15 кг/мм^2 согласно двум программам неравномерно-циклических изменений температуры от 680°C до 700°C и обратно. Продолжительность цикла изменялась в процессе опыта в пределах от 24 до 96 час. На основе 4—17 испытаний для каждой пары постоянных σ и T получены нижеследующие значения $F(\sigma, T)$:

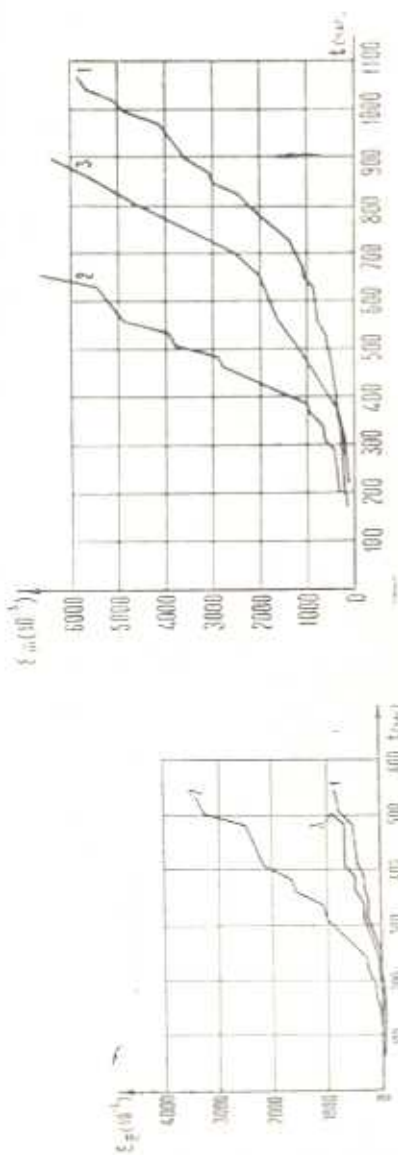
$$\begin{aligned} F(9.3 \text{ кг/мм}^2, 700^\circ\text{C}) &= \exp(-23.553) \text{ час}^{-3} \\ F(9.3 \text{ кг/мм}^2, 720^\circ\text{C}) &= \exp(-21.258) \text{ час}^{-3} \\ F(11.15 \text{ кг/мм}^2, 680^\circ\text{C}) &= \exp(-24.465) \text{ час}^{-3} \\ F(11.15 \text{ кг/мм}^2, 700^\circ\text{C}) &= \exp(-21.132) \text{ час}^{-3} \end{aligned} \quad (3.1)$$

На фиг. 1 приведены усредненные экспериментальные кривые (сплошные линии) и теоретические кривые (штриховые линии), подсчитанные по формуле (2.2) при значениях (3.1); пунктирными линиями ограничены области нахождения соответствующего математического ожидания с определенной вероятностью (0.9 для кривых 1 и 3, 0.683 для кривых 2 и 4).



Фиг. 1. Кривые ползучести
 1) при $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$, $T = 700^\circ\text{C}$
 2) при $\sigma = 9.3 \text{ кг/мм}^2$, $T = 720^\circ\text{C}$
 3) при $\sigma = 9.3 \text{ кг/мм}^2$, $T = 700^\circ\text{C}$
 4) при $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$, $T = 680^\circ\text{C}$

На фиг. 2—5 приведены экспериментальные кривые (1) деформаций $\varepsilon_{III}(t)$ при многоступенчатых изменениях температуры, а также теоретические кривые (2), построенные согласно (2.4). Легко видеть, что во всех



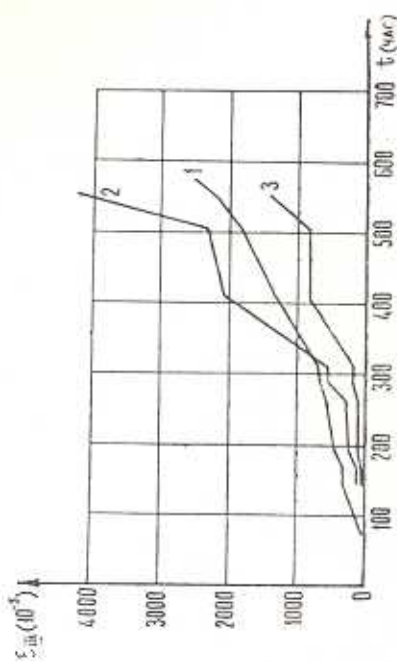
Фиг. 3.

Фиг. 2.
Кривые ползучести ϵ_{II} (t) при напряжениях 11,15 кг/мм² и при изменении температуры от 700 °С до 680 °С и обратно.



Фиг. 4.

Кривые ползучести $\epsilon_{ш}(t)$ при напряжении $9,3 \text{ кВ/см}^2$ и при изменении температуры от 700°C до 720°C и обратно.



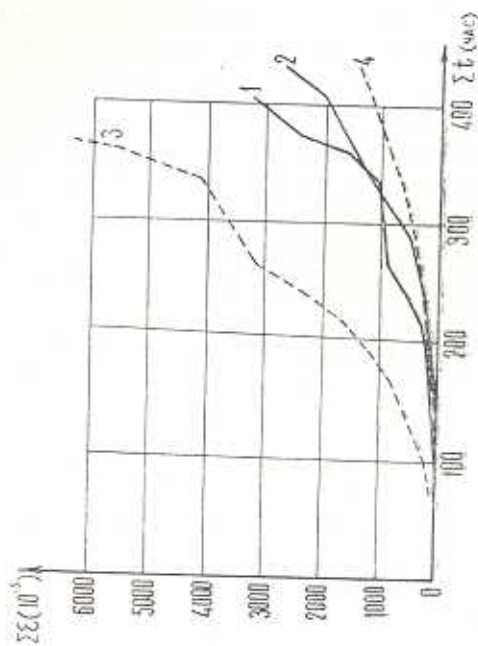
Фиг. 5.

рассмотренных случаях уравнение (2.4) предсказывает более интенсивную ползучесть, чем наблюдается в действительности, и, следовательно, в известной мере, можно гарантировать, что время достижения некоторой деформации ползучести будет не меньше предсказанной уравнением (2.4). Пересечение усредненной кривой (1) с осью t , имеющее место на фиг. 2, означает тот факт, что в данном случае колебания температуры привели к скоростям ползучести даже меньшим установившимся. Линиями (3) на фиг. 2—5 показаны теоретические кривые $\varepsilon_{III}(t)$, построенные при пренебрежении ползучестью на ступенях меньшей температуры и при пренебрежении влиянием ее на последующие деформации ε_{III} , что, как показано [12], соответствует замене ползучести на ступенях меньшей температуры полной разгрузкой.

Легко видеть, что при пренебрежении ползучестью на ступенях меньшей температуры приходим к более точному описанию экспериментальных данных. Отсюда естественным было бы предположить, что при многоступенчатых изменениях температуры следует определять общую продолжительность нахождения образца на ступенях более высокой температуры (Σt_{2i+1}) и затем соответствующую деформацию ползучести брать из кривой $\varepsilon_{III}(t = \Sigma t_{2i+1})$ при этой постоянной температуре. Однако, как будет показано ниже, такое предположение неверно.

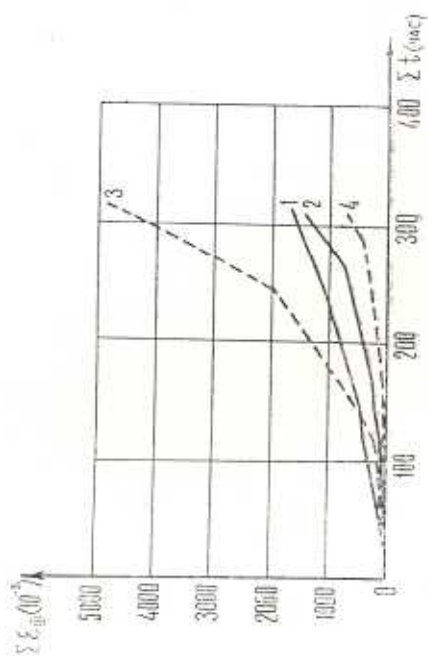
На фиг. 6 и 7 приведены экспериментальные и построенные согласно (2.4) теоретические кривые в координатных осях $\Sigma \varepsilon_{2i+1}$ (доля деформации ε_{III} , накопленная при 720°C и при $\sigma = 9.3 \text{ кг/мм}^2$) — Σt_{2i-1} (общая продолжительность нахождения образца при 720°C и $\sigma = 9.3 \text{ кг/мм}^2$, а также в координатных осях $\Sigma \varepsilon_{2i}$ — Σt_{2i} , то есть в соответствующих координатах при 700°C и $\sigma = 9.3 \text{ кг/мм}^2$ для двух программ многоступенчатого изменения температуры. Из сравнения кривых можно заключить, что доли деформаций, накапливаемые в образце на ступенях $T = 700^\circ\text{C}$, отнюдь не являются пренебрежимо малыми в сравнении с деформациями, накапливаемыми при 720°C , несмотря на то, что в условиях постоянных температур (фиг. 1) деформации ε_{III} при 720°C существенно велики в сравнении с деформациями ползучести ε_{III} при 700°C . При этом (фиг. 6, 7) деформации ползучести при 700°C почти в два раза превосходят подсчитанные по формуле (2.4), а при 720°C , наоборот, значительно меньше теоретических.

Таким образом, в условиях постоянных напряжений деформации ползучести в третьей стадии при низких температурах упрочняют материал с точки зрения сопротивляемости ползучести при более высоких температурах, а деформации ползучести при высоких температурах, наоборот, разупрочняют материал с точки зрения сопротивляемости ползучести при более низких температурах. Необходимо отметить, что этот вывод касается лишь деформаций с возрастающей скоростью, соответствующих третьей стадии ползучести, а для ползучести в первых двух стадиях, как показано, например, в [13], имеет место противоположный эффект, а именно, при уменьшении температуры деформации ползучести почти останавливаются и, затем, ускоряясь, протекают со скоростью, меньшей соответствующей скорости на второй стадии ползучести, что, в известной мере, аналогично



Фиг. 7.

Сравнение долей деформаций при накоплении при данной температуре и условиях об ступенчатых изменений.
1 и 2 — акспериментальные, 3 и 4 — теоретические кривые соответственно при 720 °С и при 700 °С.



Фиг. 6.

инкубационному периоду, наблюдавшемуся при частичных разгрузках [18, 19].

Рассмотрим эти эффекты, исходя из физических представлений. Как указано в работе [16, стр. 224], скорость ползучести может быть определена как функция текущих напряжения и температуры, а также некоторых величин, определяющих структуру материала в текущий момент, и числе которых, несомненно, являются плотность линейных дислокаций и плотность препятствующих их движению закреплений в виде границ зерен, пересечений дислокаций или точечных дефектов (внедренные или инопродные атомы на поверхности движения дислокаций и т. д.).

В первой стадии ползучести накопление препятствий, сопровождающее деформации ползучести, оказывается более эффективным, чем размножение самих дислокаций^{*}, причем этот процесс тем интенсивнее, чем выше температура. Вследствие этого при понижении температуры в процессе опыта от значения T_1 до T_2 ($T_1 > T_2$) структура материала, образовавшаяся во время ползучести при T_1 , оказывается более жесткой, чем та, которая могла образоваться во время ползучести при T_2 , чем и определяется замедление ползучести в первой стадии при уменьшении температуры.

В третьей стадии ползучести в местах скопления дислокаций концентрируются вакансии [21], ослабляющие границы зерен и способствующие трещинообразованию. Этот процесс диффундирования препятствий, способствующий более интенсивному движению и размножению дислокаций, естественно, протекает тем интенсивнее, чем выше температура. Таким образом, ползучесть в третьей стадии при высокой температуре должна разупрочнить материал с точки зрения сопротивляемости ползучести больше, чем при относительно низкой, что и было здесь получено экспериментально. Отметим, что эта интерпретация вполне увязывается с экспериментальным результатом о повышении долговечности кристалла с увеличением размера зерна [17] и с тезисом Бейли, указывающим, что длительное разрушение, сопровождающееся продолжительной третьей стадией ползучести, происходит между зернами кристалла [22, стр. 265].

4. Основные выводы

1. В третьей стадии высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали теплосмены, сопровождающиеся возникновением незначительных температурных напряжений, в процессе испытания не приводят к дополнительному росту скорости ползучести.

2. Основное операторное уравнение ползучести, хорошо описывающее деформации ползучести при переменных напряжениях, предсказывает более интенсивный рост ползучести в третьей стадии, чем это имеет место в действительности.

3. Деформации ползучести в третьей стадии при относительно низких температурах являются более благоприятными с точки зрения последую-

^{*} Как известно [20], линейные дислокации способны неограниченно размножаться с помощью, например, источника Франка-Рида.

щей сопротивляемости материала ползучести, чем аналогичные деформации при относительно высоких температурах.

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 3 VI 1976

Ա. Մ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

ԽՐՈՄԱՆԻԿԵԼԱՅԻՆ ՊՈԴՊԱՏԻ ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍԻՃԱՆԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ԵՐՐՈՐԳ-
ՓՈՒԼԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԶԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ԲԱԶՄԱՍԻՃԱՆ
ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Գրասրկվում է X18H10T պողպատի սողքը ջերմաստիճանային փոփոխությունների և անփոփոխ լարումների ազդեցության դեպքում:

Ցույց է տրված, որ երրորդ փուլում համեմատաբար ցածր ջերմաստիճաններում առաջացած սողքի դեֆորմացիաները ավելի են բարձրացնում նյութի դիմադրողականությունը քան թե համեմատաբար բարձր ջերմաստիճաններում առաջացած սողքի դեֆորմացիաները, որը հակառակն է սողքի առաջին երկու փուլերում տեղի ունեցած երևույթներին: Տրված է համեմատությունը հեղինակի կողմից անցյալում առաջարկված օպերատորային հավասարման կիրառման եղանակի օգնությամբ ստացված արդյունքների հետ:

AN INVESTIGATION ON THIRD STAGE OF
HIGH-TEMPERATURE CREEP OF CHROME-NICKEL STEEL
IN CONDITIONS OF STEP CHANGES IN TEMPERATURES

A. M. SIMONIAN

S u m m a r y

The creep of steel X18H10T on constant strain of tension and repeated variable temperature in conditions of accelerated creep is investigated. The operating equation to describe creep at variable temperatures is considered.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кохей Р. Г., Хейт В. Б. Влияние циклических перегрузок на скорости ползучести и время до разрушения никонеля при 925° и 980°. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
2. Гусов А. Б. Поведение жаропрочных материалов при циклических температурах и напряжениях. Сб. Жаропрочные материалы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
3. Смит Г., Гаустон Е. Опыты по изучению влияния переменных напряжений и температур на длительную прочность сталей. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.

4. Гварниери Г. Характеристики длительной прочности листовых материалов при циклических нагрузках и температурах. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
5. Соснин О. В. О ползучести слабо упрочняющихся материалов при нестационарных температурно-силовых режимах. Проблемы прочности, 1972, № 1.
6. Герберт Д. С., Армстронг Д. Н. Испытание на ползучесть сплавов инконик при изменяющихся напряжениях и температуре. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
7. Brophy G. R., Furman D. E. The Cyclic Temperature Acceleration of Strain in Heat-Resisting Alloys. Trans. ASM, 1942, v. 30.
8. Никитин В. И., Комиссарова И. Н., Панкратьева Н. В. Экспериментальная проверка параметрического метода расчета жаростойкости материалов при переменной температуре. Физико-химическая механика материалов, 1973, т. 9, № 5.
9. Карслоу Г., Еггер Д. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
10. Mathonet J., Caubo M. The temperature, a scattering parameter of the creep-rupture test-results. „Met. Repts. C.R.M. Benelux“, 1973, № 34.
11. Lemaitre Jean, Halley Jean Claude, Polscella Humbert. Influence du parametre vitesse de temperature sur le comportement des solides elasto-visko-plastiques. „C. r. Acad. sci.“, 1968, v. 267, № 15.
12. Симомян А. М. Исследование высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали в условиях ступенчатых изменений напряжения. Изв. АН АрмССР, Механика, 1974, XXVII, № 4.
13. Симомян А. М. Исследование ползучести стали X18H10T при переменных температурах. Известия АН АрмССР, Механика, 1972, т. XXV, № 2.
14. Симомян А. М. Исследование ползучести стали X18H10T при больших деформациях. Проблемы прочности, 1975, б.
15. Симомян А. М. Исследование высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали при циклических изменениях напряжения. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1976, т. XXIX, № 3.
16. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
17. Куров В. Д., Мельников Г. П., Соколов А. А. Влияние структуры материала на длительную прочность. Научные труды ин-та механики МГУ, 1973, № 23.
18. Davies P. W., Nemes G., Williams K. R., Wiltshire B. Stress-change experiments during high-temperature creep of copper, iron and zinc. „Metal. Sci. J.“, 1973, 7, May.
19. Vidal G. Sur le fluage periodique des alliages resistants a chaud. Revue de Metallurgie, 1956, v. 53, № 7.
20. Коттрелл А. Х. Строение металлов и сплавов. М., Металлургиядат, 1961.
21. Трунин И. И., Миркин И. А. Исследование разрушения стали при ползучести. Металловедение и обработка металлов, 1958, № 11.
22. Одинг Н. А., Иванова В. С., Бурзукский В. В., Геминюв В. Н. Теория ползучести и длительной прочности металлов. М., Металлургиядат, 1959.