

А. М. СИМОНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ХРОМО-НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ СТУПЕНЧАТЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Большинство энергетических установок и деталей машин работает в условиях нестационарных тепловых и силовых воздействий. Вследствие этого вопрос о предсказании деформативности материалов при произвольных изменениях напряжений и температур в больших пределах деформаций является актуальным. Общепринятые теории ползучести, которые, базируясь на экспериментальных данных о ползучести при постоянных напряжениях и температурах, в ряде случаев правильно предсказывают ползучесть при плавных и ступенчатых изменениях напряжений, в случае циклических или многократно изменяющихся напряжений иногда приводят к заниженной оценке ползучести [1—5]. Иногда цикличность напряжений приводит к ускорению наступления третьей стадии ползучести даже при небольших напряжениях [6]. Эти факты, а также и то, что протекание ползучести с возрастающей скоростью у некоторых металлов является продолжительным и начинается довольно скоро после приложения нагрузки (см., например, [7]), определяют учет деформаций ползучести третьей стадии при частых изменениях напряжения, тем более, что при инженерных расчетах, проводимых с целью гарантии от разрушения, вряд ли имеет смысл пренебрегать деформациями с возрастающей скоростью, приводящими к разрушению.

Настоящая работа посвящена исследованию ползучести хромо-никелевой стали X18Ni10T при ступенчатых и при различных неравномерно-циклических приложениях нагрузок, а также проверке одного феноменологического уравнения, учитывающего деформации «запаздывающей пластичности», обратимые деформации наследственности, а также деформации третьей стадии ползучести.

1. О методике экспериментальных исследований

Опыты производились на испытательной машине Zsl 502.10 Раунштейн, у которой были усовершенствованы термомизмерительное и терморегулирующее устройства. В процессе испытания на ползучесть температура измерялась непосредственно на поверхности образца и регулировалась путем периодического включения и выключения нагревательного устройства печи с колебаниями $\pm 2^\circ\text{C}$ и с периодом около 2 мин. В процессе опыта на всех установках температура контролировалась с помощью одного и того же милливольтметра.

Нагрузка на образец передавалась путем плавного подъема с упора двухступенчатого рычажного приспособления, а в процессе опыта ступенчатое изменение напряжения осуществлялось вручную при строгом недопущении динамических эффектов.

Испытуемые образцы $\varnothing 8$ мм вытачивались из прутков $\varnothing 15$ мм стали X18H10T при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность с целью предотвращения нагрева образца в процессе обработки.

Точность измерения деформаций, обеспечиваемая с помощью оптического устройства, составляет $0.5 \cdot 10^{-5}$.

2. О ползучести при постоянных нагрузках

Как показано в работах [8, 9], для ряда материалов, в том числе для нержавеющей стали при относительно небольшой длительности испытания*, деформации ползучести при постоянных напряжении и температуре, хорошо описываются следующим аппроксимирующим уравнением

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

где α , β и γ легко определяются [10] значениями напряжения σ и температуры T , при которых проводится испытание на ползучесть. Формула (2.1), как известно, соответствует распространенной схеме Эндрейда.

Однако, как показали проведенные эксперименты при 700°C и при напряжениях 9.30 кг/мм^2 , 11.15 кг/мм^2 и 12.40 кг/мм^2 (фиг. 1), при достаточной длительности эксперимента кривые ползучести (показаны сплошными линиями) оказываются вогнутостью вверх, и использование зависимости (2.1) (показано штриховыми линиями) приводит к все возрастающей во времени погрешности.

Штрих-пунктирными линиями показаны теоретические кривые ползучести, построенные, согласно теории старения в применении к (2.1), с учетом изменения длины и поперечных размеров образцов [11] в процессе ползучести. Как вытекает из фиг. 1, возрастание скорости ползучести не определяется указанными причинами и, вероятно, связано с образованием местных трещин [12].

В связи с этим для описания экспериментальных кривых ползучести предлагается феноменологическое уравнение

$$\varepsilon_c(t) = \beta(1 - e^{-\gamma t}) + \alpha t + \varepsilon_{III}(t) \quad (2.2)$$

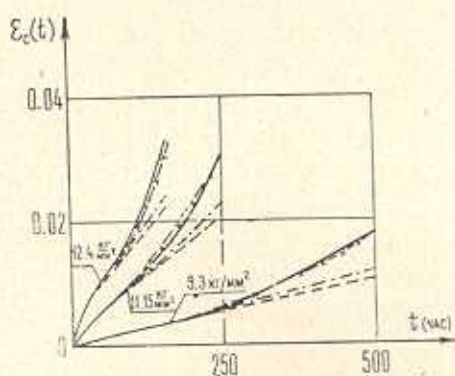
где $\varepsilon_{III}(t)$ — деформации с возрастающей во времени скоростью. На фиг. 1 штриховыми линиями с крестиками показаны кривые, построен-

* Под термином «относительно небольшая длительность испытания» здесь понимается такая длительность испытания, при которой деформации, соответствующие III стадии ползучести, пренебрежимо малы по сравнению с общей деформацией ползучести.

ные согласно (2.2) при следующей аппроксимации $\varepsilon_{\text{пл}}(t)$ по напряжению и времени при 700°C :

$$\varepsilon_{\text{пл}}(t) = k \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{13.3} t^2 \quad (2.3)$$

где $k=0.497 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}^2$, $R=31 \text{ кг/мм}^2$ — кратковременная прочность испытуемой стали при 700°C . Отметим, что α , β и γ были взяты соответствующими усредненным экспериментальным кривым без аппроксимации по напряжениям, дабы связанные с этой аппроксимацией приближения не влияли бы на оценку уравнений (2.2) и (2.3). Аналитическое представление деформаций ползучести во времени в форме (2.2) и (2.3), по-видимому, удобнее предложенной в [13] как с точки зрения определения параметров уравнения, так и с точки зрения обобщения на случай переменных напряжений и температур.



Фиг. 1.

3. О ползучести при ступенчатых изменениях напряжения

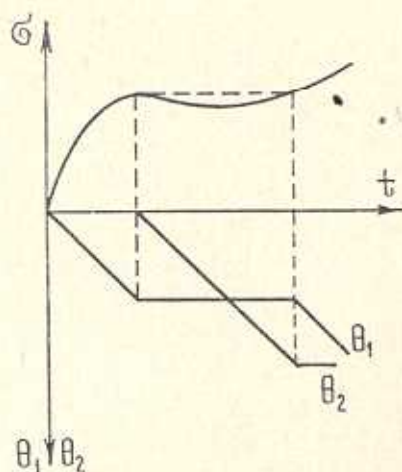
Обобщение уравнения (2.2) на случай переменных напряжений, вообще говоря, может осуществляться различными способами в зависимости от принятой теории ползучести. Однако, обобщение (2.2) при учете (2.3), согласно наследственной теории [14], как это делалось в работе [9] для уравнения (2.1), возможно лишь формально, так как формула (2.3) с некоторого момента времени описывает ползучесть с возрастающей скоростью, что при принятии принципа наследственности соответствует усиливающейся памяти материала. Невозможность существования материала с усиливающейся памятью демонстрируется на опыте по обратной ползучести, где деформации ползучести после полной разгрузки должны были бы неограниченно расти с возрастающей скоростью в направлении предшествующего напряжения, что невозможно.

Использование наследственного принципа для первого члена (2.2) в случае уменьшающихся во времени напряжений приводит к завышен-

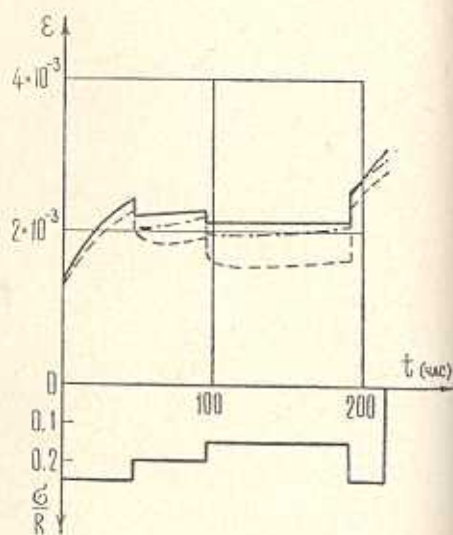
ным деформациям обратной ползучести [9], в связи с чем затухающая часть ползучести (β -ползучесть) здесь, аналогично [15, 16], рассматривается как сумма обратимой деформации ползучести (β_0 -ползучести) и деформации запаздывающей пластичности (β_1 -ползучести). Обобщение (2.2) на случай переменных напряжений запишем в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(t) = & \int_0^t [\beta_0[\sigma(\tau)] \gamma e^{-\gamma(t-\tau)} + \alpha[\sigma(\tau)]] d\tau + \\ & + \int_0^{\theta_1} [\beta_1[\sigma(\tau + \theta_2)] \gamma e^{-\gamma(t-\tau)}] d\tau + \Pi[\sigma(t)] \end{aligned} \quad (3.1)$$

где θ_1 —сумма промежутков времени, в течение которых действующее напряжение не меньше максимально достигнутого за предшествующее время нахождения образца под нагрузкой, $\theta_2 = t - \theta_1$ (правило определения θ_1 и θ_2 в зависимости от изменения напряжения $\sigma(t)$ во времени проиллюстрировано на фиг. 2), $\Pi[\sigma(t)]$ —некоторый оператор, описывающий деформации с возрастающей скоростью и вырождающийся при постоянных напряжениях в (2.3). Отметим, что деформации ползучести за вычетом третьей стадии могли бы быть обобщены на случай переменных напряжений согласно теории Малинина—Хажинского [17], которая, как показано в [10], лучше описывает деформационные кривые, однако приводимая запись при своей относительной простоте не приводит к большим погрешностям.



Фиг. 2.



Фиг. 3.

На фиг. 3 представлены деформационная кривая (сплошная линия) стали X18Ni10T при 600°C и при ступенчато-переменном напряжении [9] при длительности эксперимента, когда деформации $\varepsilon_{ин}(t)$ практи-

чески не проявляются, а также теоретические кривые — штрих-пунктирная, построенная согласно (3.1) при пренебрежении $\Pi[\sigma]$, и штриховая, построенная согласно обычной наследственной теории без выделения деформаций запаздывающей пластичности и с нелинейными по напряжениям мгновенными деформациями. Значения $\beta_0(\sigma)$, используемые при построении соответствующих теоретических кривых, определялись из опытов на обратную ползучесть.

Из сравнения приведенных кривых заключаем, что уравнение (3.1) существенно лучше описывает деформационные кривые ползучести, чем обычное уравнение наследственности, и, следовательно, некоторые осложнения, связанные с выделением деформаций запаздывающей пластичности, иногда могут быть оправданы.

Рассмотрим теперь вопрос построения оператора $\Pi[\sigma]$, или что то же, обобщения (2.3) на случай переменных напряжений. Как было указано выше, оператор $\Pi[\sigma]$ будет внутренне противоречивым при обобщении (2.3) согласно наследственному принципу. Естественным представляется в применении к $\varepsilon_{III}(t)$ использовать основной принцип гипотезы уравнения состояния [1], согласно которой скорость ползучести $\frac{d\varepsilon_{III}}{dt}$ однозначно определяется напряжением, температурой и ε_{III} , имеющими место в данный момент, независимо от истории нагружения.

Для построения соответствующего уравнения дифференцируется (2.3) при условии постоянного напряжения и в полученный результат подставляется время t , выраженное через σ и ε_{III} , согласно (2.3),

$$\frac{d\varepsilon_{III}}{dt} = 3k \frac{1}{R} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{4.4(3)} \varepsilon_{III}^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

Распространяя (3.2) на случай переменных напряжений, после интегрирования получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_{III}(t) = \Pi[\sigma(t)] &= k \left[\int_0^t \left(\frac{\sigma(\tau)}{R} \right)^{4.4(3)} d\tau \right]^{\frac{3}{2}} = \\ &= 3k \int_0^t \left[\frac{\sigma(\tau)}{R} \right]^{4.4(3)} \left[\int_0^{\tau} \left(\frac{\sigma(\xi)}{R} \right)^{4.4(3)} d\xi \right]^{\frac{3}{2}} d\tau \end{aligned} \quad (3.3)$$

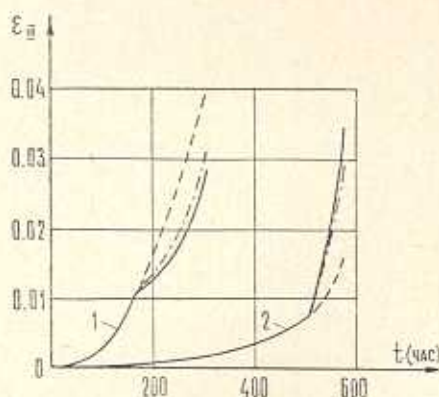
Формула (3.3) является обобщением (2.3) согласно принципу гипотезы уравнения состояния; в этом случае для деформаций $\Pi[\sigma(t)]$ имеет место коммутативный закон [18].

Запишем выражение $\Pi[\sigma(t)]$ в более общем виде

$$\Pi[\sigma(t)] = 3k \int_0^t \left[\frac{\sigma(\tau)}{R} \right]^{\lambda} \left[\int_0^{\tau} \left(\frac{\sigma(\xi)}{R} \right)^{\nu} d\xi \right]^{\mu} d\tau \quad \lambda + 2\mu = 13.3 \quad (3.4)$$

При $\lambda = 4.4(3)$ уравнение (3.4) вырождается в (3.3).

На фиг. 4 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые деформаций ползучести за вычетом затухающей и установившейся долей ползучести, определяемых в отдельности для каждого образца, в условиях одноступенчатых изменений напряжений от 12.40 кг/мм² до 11.15 кг/мм² (линия 1) и от 9.30 кг/мм² до 11.15 кг/мм² (линия 2). Штриховыми линиями показаны теоретические кривые, построенные согласно гипотезе уравнения состояния в применении к $\varepsilon_{ш}$ (3.3), а штрих-пунктирными — согласно (3.4) при $\lambda=10$. Как заключаем из фиг. 4, выражение (3.2) для $\Pi[\sigma(t)]$ при $\lambda=10$ хорошо описывает деформации с возрастающей скоростью как в случае повышения напряжения, так и в случае его понижения.



Фиг. 4.

В связи с вышеизложенным, уравнение ползучести при переменных напряжениях запишем в виде

$$\varepsilon_c(t) = \int_0^t [\beta_0[\sigma(\tau)] \tau e^{-\tau(t-\tau)} + \alpha[\sigma(\tau)]] d\tau + \int_0^{t_1} \beta_1[\sigma(\tau + t_2)] \tau e^{-\tau(t_1-\tau)} d\tau + 3k \int_0^t \left[\frac{\sigma(\tau)}{R} \right]^n \left[\int_0^{\tau} \left(\frac{\sigma(\xi)}{R} \right)^n d\xi \right]^2 d\tau \quad (3.5)$$

Перейдем к рассмотрению ползучести при циклических нагружениях. Как отмечается в работе [4], действие циклических перегрузок приводит к возрастанию установившейся скорости ползучести, а в работе [5] предложена система уравнений структурной теории ползучести, согласно которой циклические нагружения приводят к так называемой «ускоренной» деформации по отношению к случаю действия постоянного напряжения. Отметим, что в некоторых экспериментальных исследованиях [19, 20] «ускоренные» деформации не имели места. Согласно (3.3), в случае циклических нагружений (до одного и того же напряжения), чередующихся с полной разгрузкой как для равномерных, так и для неравномерных циклов, деформации ползучести, за вычетом

затухающей и установившейся частей, определяются лишь временем нахождения образца под данной нагрузкой. Этот принцип в известной мере аналогичен линейной теории накопления повреждений (см., например, [21, 22]) в теории длительной прочности.

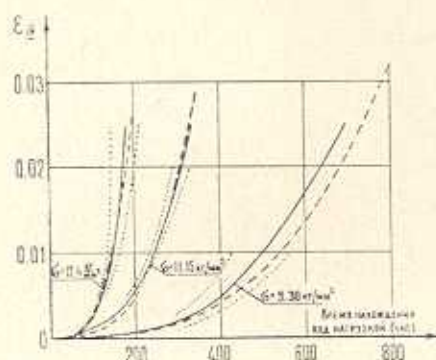
Для проверки указанного принципа были проведены экспериментальные исследования той же стали при 700°C и при циклических нагружениях до напряжений 9.30 кг/мм^2 , 11.15 кг/мм^2 и 12.40 кг/мм^2 в условиях различных и существенно неравномерных циклов. Эксперименты при циклических нагружениях до 9.30 кг/мм^2 проводились с общей длительностью от 268 до 1226 часов со средней продолжительностью цикла от 16 до 60 часов и с общим количеством циклов от 6 до 35, причем выдержка на одной ступени изменялась в весьма широких пределах — от 1 часа до 840 часов. При нагружениях до 11.15 кг/мм^2 эксперименты проводились с общей длительностью от 76 до 554 часа со средней продолжительностью цикла от 15 до 79 часов и с общим количеством циклов от 7 до 33, причем выдержка напряжения на одной ступени изменялась от 1 часа до 283 часа. При нагружениях до 12.40 кг/мм^2 эксперименты проводились с общей длительностью от 274 до 428 часов со средней продолжительностью цикла от 12 до 50 часов и с общим количеством циклов от 7 до 21, причем выдержка напряжения на одной ступени изменялась от 1 часа до 139 часов. Отношение длительности нахождения под нагрузкой к общей длительности эксперимента изменялось при 9.30 кг/мм^2 и 11.15 кг/мм^2 в пределах 0.5—0.8, а при 12.40 кг/мм^2 — в пределах 0.3—0.8. Экспериментальные кривые были построены в координатах ε_{III} — время нахождения образца под нагрузкой для различных случаев циклического нагружения. Указанные экспериментальные кривые $t_x(\varepsilon)$ оказались сгущенными около усредненных кривых $t_y(\varepsilon)$ при соответствующих постоянных нагрузках, причем отклонения

в форме
$$\frac{\int_0^{\varepsilon} |t_x(\varepsilon) - t_y(\varepsilon)| d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon} t_y(\varepsilon) d\varepsilon}$$
 при любых деформациях ε не превы-

шали 20%. При этом не было найдено какой-либо закономерности этих отклонений в зависимости от средней продолжительности цикла.

На фиг. 5 сплошными линиями показаны усредненные экспериментальные кривые при циклическом нагружении, штриховыми линиями — теоретические кривые, построенные согласно (3.4) (для данной программы нагружения теоретические кривые инвариантны в отношении значения λ), пунктирными линиями ограничена область, в которой с вероятностью 0.9 находится усредненная кривая из бесчисленного множества экспериментов, то есть математическое ожидание соответствующей кривой ползучести (вычисления проделаны согласно [23]). Указанные области расширяются при больших деформациях (0.02—0.05), однако это расширение связано не с увеличением разброса экспериментальных кривых, а с тем, что до этих деформаций было доведено мень-

ше образцов, чем при меньших деформациях. При $\varepsilon_{III} > 0.02$, $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$ и $\varepsilon_{III} > 0.01$, $\sigma = 9.30 \text{ кг/мм}^2$ количество образцов было меньше пяти и поэтому приведены лишь усредненные кривые без вероятностных оценок.



Фиг. 5.

Из сравнения экспериментальных и теоретических кривых можно заключить, что уравнение (3.3) в применении к испытанной стали, несмотря на экстраполяцию до большей продолжительности действия нагрузки (ср. с данными фиг. 1), вполне удовлетворительно описывает ползучесть в больших пределах деформаций как в случае возрастающих или убывающих напряжений, так и при различных циклических нагружениях, чередующихся с разгрузкой.

Для приложений уравнение (3.3) в некоторых случаях может быть упрощено путем пренебрежения членами β_0 и β_1 , что при длительных воздействиях напряжений приводит к незначительным погрешностям.

В заключение приводится таблица усредненных значений α , β , γ и β_0 при 700°C .

Таблица

σ (кг/мм ²)	α (10^{-5} /мин)	β (10^{-5})	β_0 (10^{-5})	γ ($\frac{1}{\text{час}}$)
9.3	0.035	46	37	0.07
11.15	0.129	200	50	0.07
12.4	0.183	470	55	0.07

Ա. Մ. ՍԻՄՈՆԻԱՆ

ԽՐՈՄՆԻԿԵԼԱՅԻՆ ՊՈԼՊԱՏԻ ԲԱՐՁՐԱՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ
ՇԵՏԱՋՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԼԱՐՄԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՓՈՓՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Շեռապոստվում է խրոմանիկելային պողպատի սողքը 700° -ի դեպքում անփոփոխ, աստիճանա-փոփոխական և անհավասար ցիկլիկ լարման պայմաններում: Կառուցվում է երևույթի նկարագրման ընդհանուր հավասարումը, որը հաշվի է առնում «ուշացող պլաստիկության» դեֆորմացիաները, ժառանգականության վերադարձող դեֆորմացիաները ինչպես և սողքի երրորդ ստադիայի դեֆորմացիաները:

AN INVESTIGATION ON HIGH-TEMPERATURE CREEP
OF CHROME-NICKEL STEEL IN CONDITIONS
OF STEP CHANGES IN STRESSES

A. M. SIMONIAN

S u m m a r y

The creep of chrome-nickel steel at 700°C in conditions of step-variable and non-uniformly cyclic stresses is investigated. A phenomenologic equation describing deformations of „delay plasticity“, reversible deformations of heredity as well as deformations of the third stage of creep is derived.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. Наука, М., 1966.
2. Франссон А. Влияние одновременного циклического изменения напряжения и температуры на жаропрочный материал. Усталость металлов. ИЛ, М., 1961.
3. Коннеди А. Дж. Влияние переменных напряжений на ползучесть и отдых. Усталость металлов. ИЛ, М., 1961.
4. Кохей Р. Г., Хойт В. Б. Влияние циклических перегрузок на скорости ползучести и время разрушения инконеля при 925 и 980°C . Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
5. Lagneborg R. A theoretical approach to creep deformation during intermittent load. Trans. ASME, D, 93, № 2, 1971.
6. Гварниери Г. Характеристики длительной прочности листовых материалов при циклических нагрузках и температурах. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
7. Ковпак В. И. К вопросу о прогнозировании ползучести жаропрочных металлов. Проблемы прочности, № 4, 1971.

8. *Гарофало Ф.* Законы ползучести и длительной прочности металлов. Металлургия, М., 1968.
9. *Симолян А. М.* Экспериментальное исследование ползучести нержавеющей стали X18Ni10T при 600°C. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXII, № 6, 1969.
10. *Симолян А. М.* К вопросу о неизоотермической ползучести хромо-никелевой стали. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXV, № 6, 1972.
11. *Андрате Э. Н. да Ч.* Представление о ползучести. Сб. «Ползучесть и возврат». Металлургияиздат, М., 1961.
12. *Салли А.* Ползучесть металлов и жаропрочные сплавы. Оборонгиз, М., 1953.
13. *Murry G.* Contribution a l'etude de la forme des courbes de fluage des aciers. Rev. met. (France), 67, № 10, 1970.
14. *Арутюнян Н. Х.* Некоторые вопросы ползучести. Гостехтеориздат, М.—Л., 1952.
15. *Брызгалов Г. И.* О ползучести при переменных напряжениях. ПМТФ, № 3, 1962.
16. *Самарин Ю. И.* Об одном обобщении метода разделения деформации в теории ползучести. Изв. АН СССР, ОТН, № 3, 1971.
17. *Малинин В. Н., Хажинский Г. М.* К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением. МТТ, № 3, 1969.
18. *Одкист Ф.* Технические теории ползучести. Механика (сб. переводов), 2, 1959.
19. *Герберт Д. С., Армстронг Д. Т.* Испытание на ползучесть сплавов никоник при изменяющихся напряжениях и температуре. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
20. *Симмонс В. Ф., Кросс Н. С.* Испытание различных материалов на ползучесть при постоянном и переменном напряжении. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
21. *Журков С. Н., Томашевский Э. Е.* Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения. Сб. «Некоторые проблемы прочности твердого тела». Изд. АН СССР, 1959.
22. *Миллер Дж.* Влияние температурных циклов на прочность некоторых жаропрочных сплавов. Сб. «Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях». Госэнергоиздат, М.—Л., 1960.
23. *Гмурман В. Е.* Введение в теорию вероятностей и математическую статистику. Высшая школа, М., 1966.