ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Մեխանիկա XXIX, № 3, 1976 Механика

А. М. СИМОНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ХРОМО-НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЙ

Вопрос прогнозирования высокотемпературной ползучести материалов при циклических изменениях напряжений привлекает внимание исследователей и инженеров. К настоящему времени накопилось определенное количество экспериментальных данных о циклической ползучести, не позволяющих, однако, выработать единый подход к вопросу о предсказании ползучести при циклических изменениях напряжений.

Согласно классическим теориям ползучести [1], факт частых изменений напряжения не должен приводить к более интенсивному протеканию разупрочнения, чем это имеет место при соответствующих постоянных напряжениях, и деформации ползучести, как, впрочем, и скорости деформации при циклической ползучести должны заключаться в пределах соответствующих значений при наибольшем и наименьшем постоянных напряжениях. Наряду с подтверждением этой точки зрения [2, 3], в ряде работ [4—8] показано, что цикличность действующего напряжения приводит к более интенсивному разупрочнению, чем это предсказывается классическими теориями. В работе [9], в математической аналогии с [10], для материалов без III стадии ползучести строится структурная теория, согласно которой при циклических изменениях напряжения имеет место так называемая «ускоренная» деформация.

Факт более интенсивного разупрочнения материала при циклических изменениях напряжения по сравнению с действием постоянных напряжений подтверждался и при изучении долговечности и длительной прочности [11—13], хотя в некоторых опытах [14, 5] это и не подтверждалось. В работе [15] предпринят полезный для приложений эмпирический подход к описанию циклической ползучести, не позволяющий, однако, предсказывать, например, ползучесть при случайных неравномерных циклах изменений нагрузок. Вероятно, указанная противоречивость в оценке циклической ползучести, в некоторой мере, связана с отсутствием учета деформаций III стадии ползучести. В работе [16] предлагается теория ползучести и длительной прочности для материалов, у которых ползучесть при постоянных напряжениях протекает с непрерывно-возрастающей скоростью. Более простые уравнения ползучести для материалов с разупрочнением, экспериментально подтвержденные при одноступенчатом изменении напряжения для нержавеющей стали, рассмотрены в работе [17].

Настоящая работа посвящена исследованию циклической ползучести хромо-никелевой стали Х18Н10Т при 700°С и при существенно неравно-

мерных циклах изменения напряжения, а также оценке ряда теоретических положений.

1. *Методика исследований*

Опыты производились на цилиндрических образцах Ø8 мм при базе измерения деформации 100 мм. В процессе испытаний температура измерялась в непосредственной близости от поверхности образца и регулировалась путем периодического включения и выключения нагревательных устройств в печи, при этом имели место колебания температуры $\pm 2°C$ с периодом около 2 мин.

Растягивающая нагрузка на образец передавалась плавно с помощью двуступенчатого рычажного приспособления, а изменение ее в течение опыта осуществлялось вручную при строгом недопущении динамических эффектов. Точность измерения деформации образцов, обеспечиваемая оптическим устройством, составляла $\sim 0.5 \cdot 10^{-5}$.

Явление окалинообразования не учитывалось; действительно, как показывают расчеты на основе [18], окалинообразование у испытанных образцов может привести лишь к 0.06% уменьшения первоначальной площади поперечного сечения образца.

2. *Теоретические положения*

В работе [17] рассматривалось уравнение ползучести при одноосном растяжении в виде

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t \{\alpha[\sigma(\tau)] + \beta_0[\sigma(\tau)]\gamma e^{-\gamma(t-\tau)}\}\, d\tau +$$

$$+ \int_0^{\theta_1} \beta_1[\sigma(\tau+\theta_2)]\gamma e^{-\gamma(t-\tau)}\, d\tau + 3k \int_0^t \left(\frac{\sigma(\tau)}{R}\right)^{\nu} \left[\int_0^{\tau} \left(\frac{\sigma(\xi)}{R}\right)^{\nu} d\xi\right] d\tau \qquad (2.1)$$

где первый член соответствует упругой обратимой деформации, второй член описывает деформации установившейся ползучести и затухающие обратимые деформации наследственности, третий член определяет затухающие необратимые деформации наследственности (затухающую пластичность), а четвертый член описывает деформации с возрастающей скоростью (θ_1 — сумма промежутков времени, в течение которых действующее растягивающее напряжение не меньше максимально достигнутого за предшествующее время нахождения образца под нагрузкой [17], $\theta_1+\theta_2=t$). Функции, входящие в (2.1), определяются из опытов при постоянных напряжениях и на обратную ползучесть.

Уравнение ползучести (2.1) довольно точно описывает деформационные кривые ползучести нержавеющей стали Х18Н10Т при $\lambda=10$, $\nu=1.65$ как в случае ступенчатости возрастания, так и в случае ступенчатого убывания действующего напряжения [17]. В случае, когда продолжительность

испытания и действующие напряжения относительно невелики, можно пренебречь последним членом, который фактически описывает разупрочнение материала, приводящее к разрушению. Наоборот, при относительно большой продолжительности испытания, как показывают опыты, превалирующими оказываются деформации установившейся ползучести $\left(\int_0^t \alpha\left[\sigma(\tau)\right] d\tau\right)$ и последний член (2.1).

Ниже будут отдельно исследованы деформации с возрастающей скоростью ε_{III} (t), соответствующие последнему члену (2.1), то есть деформации за вычетом затухающей и установившейся ее частей

$$\varepsilon_{III}(t) = 3k \int_0^t \left(\frac{\sigma(\tau)}{R}\right) \left| \int_0^\tau \left(\frac{\sigma(\xi)}{R}\right)^n d\xi \right|^n d\tau \tag{2.2}$$

При постоянном напряжении ($\sigma(t) = \sigma_0$) формула (2.2) дает

$$\varepsilon_{III}(t) = k\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^{\lambda-\nu} t^\lambda \tag{2.3}$$

Рассмотрим нижеследующую программу неравномерно циклического ступенчатого изменения напряжения:

$$\begin{aligned} &\sigma(\tau) = \sigma_0 \quad \text{при} \quad t_{2i} < \tau < t_{2i+1} \\ &\sigma(\tau) = \sigma_1 \quad \text{при} \quad t_{2i+1} < \tau < t_{2i+2} \end{aligned} \qquad i = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.4}$$

Согласно (2.2) для программы (2.4) имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_{III}(t_{2n}) = k &\left| \left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^{\lambda-\nu} - \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^{\lambda-\nu} \right| \left| \left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n-1} \theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n-1} \theta_{2j} \right|^\lambda - \\ &- \left[\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n} \theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n} \theta_{2j} \right]^\lambda \Bigg\} + k \left| \left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^{\lambda-\nu} - \\ &- \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^{\lambda-\nu} \right| \left| \left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n} \theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n-1} \theta_{2j} \right|^\lambda + \\ &+ k \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^{\lambda-\nu} \left| \left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n} \theta_{2j+1} - \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^\nu \sum_{j=1}^{n} \theta_{2j} \right|^\lambda \end{aligned} \tag{2.5}$$

где $\theta_{2j} = t_{2j} - t_{2j-1}$, $\theta_{2j-1} = t_{2j+1} - t_{2j}$ — суть продолжительности действия нагрузок σ_1 и σ_0 на соответствующем этапе циклического нагружения.

Более удобными для приложений являются рекуррентные формулы для описания деформаций при неравномерно-циклическом ступенчато изменяющемся напряжении

$$\varepsilon_{III}(t_{2n+1}) = \varepsilon_{III}(t_{2n}) + k\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^{\lambda-1}\left\{\left[\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)\sum_{j=1}^{n+1}\theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)\sum_{j=1}^{n}\theta_{2j}\right]^{\lambda} - \left[\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)\sum_{j=1}^{n}\theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)\sum_{j=1}^{n}\theta_{2j}\right]^{\lambda}\right\} \quad n = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_{III}(t_{2n+2}) = \varepsilon_{III}(t_{2n+1}) + k\left(\frac{\sigma_1}{R}\right)^{\lambda-1}\left\{\left[\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)\sum_{j=1}^{n+1}\theta_{2j-1} - \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)\sum_{j=1}^{n+1}\theta_{2j}\right]^{\lambda} - \left[\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)\sum_{j=1}^{n+1}\theta_{2j-1} + \left(\frac{\sigma_1}{R}\right)\sum_{j=1}^{n}\theta_{2j}\right]^{\lambda}\right\} \quad n = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.7}$$

В случае циклического нагружения, чередующегося с отдыхом ($\sigma_1 = 0$), согласно (2.5), имеем

$$\varepsilon_{III}(t_{2n}) = k\left(\frac{\sigma_0}{R}\right)^{2\lambda}\left(\sum_{j=1}^{n}\theta_{2j-1}\right)^{\lambda} \tag{2.8}$$

то есть деформация с возрастающей скоростью определяются общей продолжительностью нахождения образца под нагрузкой, независимо от наличия и продолжительности отдыхов, причем при отсутствии нагрузки изменения ε_{III} не имеют места. Аналогичный тезис подтверждается формулой (2.5) и при $\sigma_0 = 0$, $\sigma_1 \neq 0$. Отметим, что этот тезис в известной мере аналогичен гипотезе суммирования повреждений при изучении длительной прочности металлов [19].

Если в формуле (2.2) положить $\lambda = 1$, то она вырождается в уравнение ползучести, являющееся обобщением (2.3) на случаи переменных напряжений, согласно теории упрочнения.

Ниже приводится экспериментальная проверка формулы (2.2) при различных неравномерно-циклических изменениях напряжения.

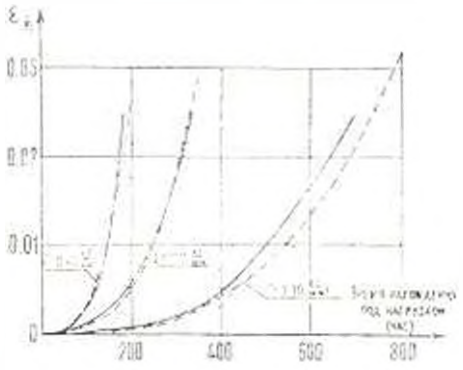
3. *Результаты экспериментальных исследований*

Проведены исследования ползучести хромо-никелевой стали Х18Н10Т при 700°С и при существенно неравномерных циклических ступенчатых изменениях осевого растягивающего напряжения.

В одной серии экспериментов производилось нагружение образцов до одного и того же напряжения, чередующееся с полной разгрузкой. Напряжения были взяты равными 9.3 *кг/мм*², 11.15 *кг/мм*² и 12.4 *кг/мм*². Было проведено от 8 до 12 испытаний при каждом из указанных напряжений, причем в каждом эксперименте была принята своя программа испытания на циклическую ползучесть при существенно неравномерных продолжительностях нахождения образца под нагрузкой и в разгруженном состоянии. Выдержка образцов под нагрузкой в пределах одного цикла менялась от 1 до 840 *час*, причем общее количество циклов доходило до 35. Отношение общей продолжительности нахождения образцов под нагрузкой к общей продолжительности испытания принималось в пределах 0.3÷0.8.

В отдельности для каждого испытанного образца были определены значения затухающей ползучести ($\beta_0+\beta_1$) и скорости установившейся ползучести (α)*, а затем вычислены деформации с возрастающей скоростью $\varepsilon_{III}(t)$, определяющие наступление третьей стадии ползучести. Экспериментальные кривые были построены в координатах $\varepsilon_{III}-\sum t_{i-1}$ (время нахождения образца под нагрузкой), причем кривые эти группировались около экспериментальных усредненных кривых $\varepsilon_{III}(t)$ при соответствующих постоянных напряжениях. Отклонения этих кривых от усредненных не достигали 20% и не отмечено какой-либо закономерности этих отклонений в зависимости от средней продолжительности цикла или от продолжительности отдыхов.

На фиг. 1 приведены усредненные кривые $\varepsilon_{III}-\sum t_{i-1}$ циклической ползучести (показаны сплошными линиями), а также штриховыми линиями показаны кривые, построенные по формуле (2.8), где значения $k=5.35$ 1/час, $R=62$ кг/мм², $\lambda=10$, $\nu=1.65$ были найдены при исследовании ползучести при постоянных и одноступенчато-переменных напряжениях [20]. Пунктирными линиями ограничены области, в которых с вероятностью 0.9 заключено математическое ожидание соответствующей экспериментальной кривой. Незначительные расхождения теоретических и экспериментальных кривых говорят в пользу уравнения (2.2).



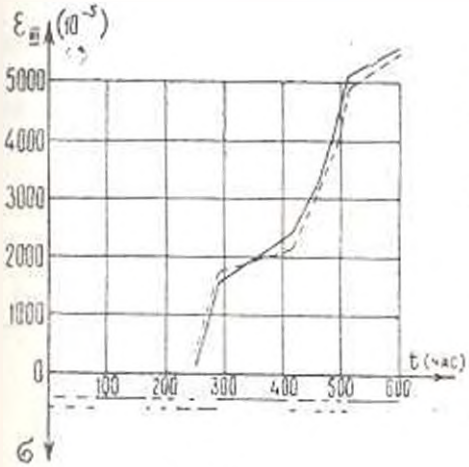
Фиг. 1.

В работе [21] указано, что степень разупрочнения при циклических изменениях напряжения тем больше, чем больше амплитуда изменения напряжения (σ_0) лишь до определенного значения σ_0, после чего имеет место обратный эффект — чем более существенны изменения напряжения, тем меньше разупрочнение. В таком случае наиболее существенное расхождение формулы (2.2), не учитывающей ускоренного разупрочнения из-за факта цикличности приложения нагрузки, с экспериментальными данными следует ожидать не при полной, а при частичной разгрузке на каждом цикле.

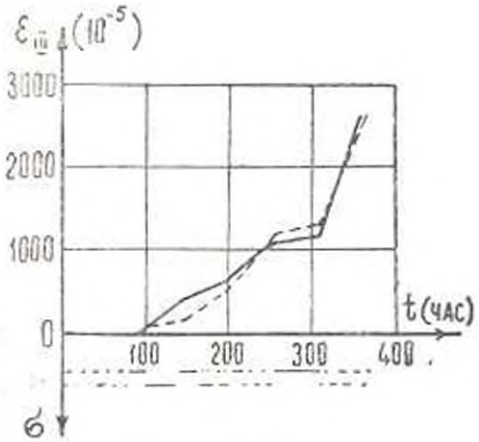
* Усредненные значения $\beta_0+\beta_1$ для напряжений 9.3 кг/мм², 11.15 кг/мм² и 12.4 кг/мм² соответственно составили 0.00046, 0.0020 и 0.0047, а α (1/час) $2.1\cdot10^{-6}$, $7.73\cdot10^{-5}$ и $11\cdot10^{-5}$.

В связи с этим были проведены исследования ползучести при различных программах циклического изменения напряжения от 9.3 кг/мм² до 11.15 кг/мм², от 11/15 кг/мм² до 12.4 кг/мм² и от 9.3 кг/мм² до 12.4 кг/мм².

Как показали испытания, сразу же после уменьшения напряжения в первых циклах изменения нагрузки имели место весьма незначительные деформации обратной ползучести, однако в последующих циклах обратная ползучесть при частичной разгрузке уже почти не наблюдалась. Временный эффект неизменности деформаций после частичной разгрузки (так называемый «инкубационный период») в настоящих исследованиях, в отличие от [21, 22], не имел места.



Фиг. 2.



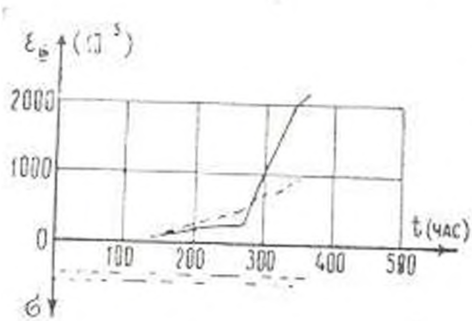
Фиг. 3.

На фиг. 2 и 3 приведены экспериментальные кривые ε_{III} (t) (показаны сплошными линиями) в сравнении с соответствующими теоретическими (показаны штриховыми линиями), построенными согласно (2.5), при двух различных программах циклических изменений напряжения от 9.3 кг/мм² до 12.4 кг/мм². Как заключаем из данных фиг. 2 и 3, формула (2.5) хорошо описывает деформации ползучести ε_{III} при вышеуказанных циклических изменениях напряжения.

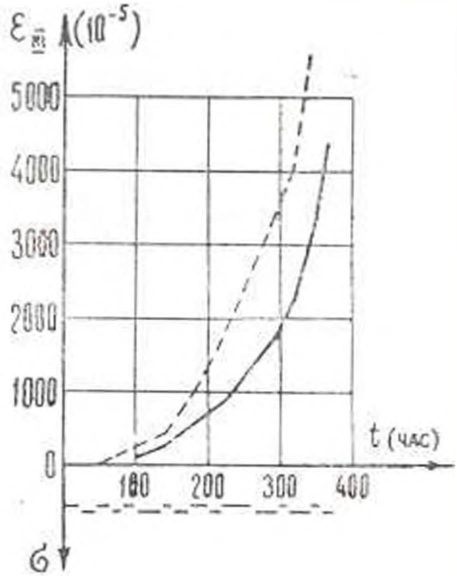
На фиг. 4 и 5 приведены аналогичные экспериментальные и теоретические кривые ε_{III} (t) при циклических изменениях напряжения соответственно от 9.3 кг/мм² до 11.15 кг/мм² и от 11.15 кг/мм² до 12.4 кг/мм². Легко видеть, что если при относительно малых напряжениях факт циклического изменения напряжения приводит к большему разупрочнению материала, чем это предсказывается уравнением (2.2), то при относительно больших напряжениях имеет место обратный эффект — действительное разупрочнение меньше предсказываемого уравнением (2.2).

Отметим еще одну особенность циклической ползучести с неполной разгрузкой: зачастую, в пределах одного цикла скорость деформации тре-

тьей стадии ползучести ε_{III} (t) на ступени наибольшего напряжения оказывается несколько большей, чем это предсказывается расчетом, а на ступени наименьшего напряжения, наоборот, меньшей, иначе говоря, чувствительность ε_{III} (t) к изменению напряжения значительнее предсказываемой уравнением (2.2). Указанная особенность не имела места при циклических испытаниях с полной разгрузкой.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

На основе проведенных исследований, вероятно, можно заключить, что разупрочнение при циклической ползучести, вообще говоря, может быть описано с помощью феноменологического уравнения (2.2).

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 19 XI 1975

Ա. Մ. ՍԱՀՈՆՅԱՆ

ԽՐՈՄՆԻԿԵԼԱՅԻՆ ՊՈՂՊԱՏԻ ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԼԱՐՄԱՆ ՑԻԿԼԱՅԻՆ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ամփոփում

Հետազոտված է X18Н10Т *պողպատի սողքը ձգող լարումների ու համասեռ ցիկլային կիրառումների և փոփոխությունների ժամանակ։*

Բերված է ֆենոմենոլոգիական սողքի հավասարումը, որտեղ հաշվի են առնվել ամրացող պլաստիկության, ժառանգականության տեսության հե-

տաղարձների դեֆորմացիաներ, ինչպես նաև դեֆորմացիաներ, որոնք համապատասխանում են սողքի երրորդ փուլին:

AN INVESTIGATION ON HIGH-TEMPERATURE CREEP OF CHROME-NICKEL STEEL IN CONDITIONS OF CYCLIC CHANGES IN STRESS

A. M. SIMONIAN

S u m m a r y

The creep of chrome-nickel steel in conditions of non-uniformly cyclic loadings and cyclic changes in stresses are investigated. A pheomenologic equation, describing deformations of "delay plasticity", reversible deformations of the theory of heredity as well as deformations of the third stage of creep are derived.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. М., Изд. «Наука», 1966.
2. *Tatra S.* Lifetime of structures subjected to varying load and temperature. Creep in structures. Springer. 1962.
3. *Брыталин Г. Н.* К описанию анизотропной ползучести стеклопластиков. ПМТФ. 1963, № 6.
4. *Кеннеди А. Дж.* Влияние переменных напряжений на ползучесть и отдых. Сб. Усталость металлов. М., ИЛ. 1961.
5. *Гварниери Г.* Характеристика длительной прочности листовых материалов при циклических нагрузках и температурах. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат. 1960.
6. *Александровский С. В., Колесников Н. А.* Нелинейная ползучесть бетона при ступенчато-изменяющихся напряжениях. Бетон и железобетон, 1971, № 6.
7. *Cunghey R. H., Hoyt W. B.* Effect of Cyclic loadings on velocity of creep and time to destruction of inconel with 9% and 9.30 . Simposium of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperatures. ASTM. S. T. P., 1954, No. 165.
8. *Смит Г., Гаустон Е.* Опыты по изучению влияния переменных напряжений и температур на длительную прочность сталей. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. Госэнергоиздат. 1960.
9. *Lagneborg R.* A theoretical approach to creep deformation during intermittent load. Trans. ASME, ser. D. 1971, 93, No. 2.
10. *Малинин Н. Н., Хажинский Г. М.* К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением. МТТ. 1969, № 3.
11. *Франссон А.* Влияние одновременного циклического изменения напряжения и температуры на жаропрочный материал. Усталость металлов. М., ИЛ. 1961.
12. *Малинин Н. Н.* О наследственной теории ползучести и малоцикловой усталости полимерных материалов. Механика полимеров. 1970, № 4.
13. *Куров В. Д., Мельников Г. П., Соколов А. А.* Влияние структуры материала на длительную прочность. Научные труды института механики МГУ. 1973, № 23.
14. *Simmons W. F., Cross H. C.* Different materials test on creep by constant and variable stressess. Simposium on Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperatures. ASTM. S. T. P., 1954, No. 165.

15. *Можаровский Н. С., Антипов Б. А.* Пластичность и разрушение жаропрочных материалов при малом числе циклов одновременного изменения температуры и нагрузки. Проблемы прочности, 1972, № 4.

16. *Соснин О. В.* Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Ползучесть и разрушение неупрочняющихся материалов. Сообщение 1. Проблемы прочности, 1973, № 5.

17. *Симонян А. М.* Исследование ползучести стали Х18Н10Т при больших деформациях. Проблемы прочности, 1975, № 6.

18. *Никитин В. И., Комиссаров И. П., Панкратова Н. В.* Экспериментальная проверка параметрического метода расчета жаростойкости металлов при переменной температуре. Физико-химическая механика материалов, 1973, т. 9, № 3.

19. *Бирдцкий В. В., Одинг И. А.* Процесс повреждаемости металлов при ползучести. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 5.

20. *Симонян А. М.* Исследование высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали в условиях ступенчатых изменений напряжения. Изв. АН АрмССР, Механика, 1974, т. XXVII, № 4.

21. *Vidal G.* Sur le fluage periodique des alliayes resistants a chaud. Revue de Metallurgie, 1956, v. 53, No. 7.

22. *Davies P. W., Nelmes G., Williams K. R., Wilshire B.* Stress-change experiments during high-temperature creep of copper, iron and zinc. "Metal Sci. J.", 1973, 7, May.