МЕХАНИКА
ТВЕРДОГО ТЕЛА
№ 5 • 1986

УДК 539.376

# РАЗРЫХЛЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

КАДАШЕВИЧ Ю. И., НОВОЖИЛОВ В. В., РЫБАКИНА О. Г.

В [1, 2] предложен критерий разрушения металлов, охватывающий как хрупкую, так и вязкую формы разрушения, в котором принимаем, что наступление разрушения определяется пластическим разрыхлением. Идеи, изложенные в этих работах, находят все более широкое признание и распространение [3—6]. Известны попытки их использования и для оценки длительной прочности металлов [7—10].

В публикуемой работе дано обобщение критерия разрушения, осуществляющее учет влияния скорости деформирования и позволяющее с единых позиций описать как кратковременную, так и длительную прочность металлов [11].

1. Согласно [1], теория пластичности, учитывающая микронапряжения и остаточное изменение объема, может быть записана так:

$$T_{ij}'=(\tau-\beta\sigma_0)d\varepsilon_{ij}^{p\prime}/d\lambda, \quad d\theta/d\lambda=\beta \tag{1.1}$$

$$T_{ij}'=\sigma_{ij}'-\rho_{ij}' \quad \rho_{ij}=k\varepsilon_{ij}^{p\prime}, \quad \theta=\varepsilon_{ii}^{p}/3, \quad \sigma_0=\sigma_{ii}/3$$

$$d\lambda=\sqrt{{}^1/_2 d\varepsilon_{ij}^{p\prime}d\varepsilon_{ij}^{p\prime}}, \quad \varepsilon_{ij}^{y\prime}=\sigma_{ij}'/(2G), \quad \varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ij}^{y}+\varepsilon_{ij}^{p} \tag{1.2}$$

Здесь $\sigma_{ij}'$, $\varepsilon_{ij}'$, $\varepsilon_{ij}^{p\prime}$ — девиаторы тензоров напряжений, деформаций, пластических деформаций, $\theta$ — пластическое разрыхление; критическое значение $\theta(\theta_p)$ зависит от напряженного состояния.

Попытки определять экспериментально $\theta$ при различных видах деформирования [12] дали качественно соответствующие теории результаты, но определение в каждом случае для каждого материала количественных данных оказалось сложным. Поэтому в [13] и последующих работах вместо $\theta$ была рассмотрена некоторая функция разрыхления $D$ — нормированное разрыхление, а соответствующий коэффициент пропорциональности определялся из опытов косвенным путем. Полученные за последнее время данные непосредственного определения $\theta$ при ползучести вызвали необходимость вернуться к изучению этого вопроса и послужили поводом к формулировке критерия прочности, применимого к случаю, когда необратимое деформирование зависит от скорости приложения нагрузки. В [13] выяснилось, что для лучшего согласования с опытом следует считать параметр $\beta$ в формулах (1.1) не постоянным, а зависящим от инварианта $\rho$: $\beta=\beta(\rho)$, $\rho=\sqrt{{}^1/_2\rho_{ij}'\rho_{ij}'}$. В частности, была принята зависимость $d\theta/d\lambda=\beta_0\rho$, $\beta_0=\text{const}$.

Макроскопический тензор $\rho_{ij}$ введен в [14] и назван тензором остаточных микронапряжений. Работа этих микронапряжений на деформациях равна отнесенной к единице объема работе всех микронапряжений на соответствующих им упругих микродеформациях. Если в [14] использована зависимость $\rho_{ij}=k\varepsilon_{ij}^p$, то в последующих работах показана целесообразность уточнения этой зависимости. Так, в [15] предложены соотношения

$$\rho_{ij}+a d\rho_{ij}/d\lambda=b\varepsilon_{ij}^p+c d\varepsilon_{ij}^p/d\lambda \tag{1.3}$$

Однако возможен и способ непосредственного определения тензора $\rho_{ij}$ из опыта. В этом случае $\rho_{ij}$ трактуется как тензор смещения центра поверхности текучести в пространстве напряжений и определяется так называемым методом зондирования. Суть его состоит в том, что по мере продвижения по пути деформирования производятся разгрузки и нагружения противоположного знака в пределах выбранного допуска на остаточную деформацию, позволяющие установить изменение $\rho_{ij}$ на всем пути деформирования при минимальной затрате опытных образцов. Примеры непосредственного определения из эксперимента приведены в [16, 17]. Из [18] видно, какие особенности приобретает критерий прочности, если определяющий закон для разрыхления имеет структуру

$$d\theta/d\lambda=\beta(\rho,\theta) \tag{1.4}$$

Было показано[1], что хорошее совпадение с опытом получается, если ограничиться простейшей формой соотношений (1.3), приняв

$$a=c=\lambda+\lambda_0,\quad b=0,\quad \lambda_0>0 \tag{1.5}$$

Однако при использовании (1.5) описывается лишь узкий класс циклически упрочняющихся материалов, поэтому желательно сохранить общую форму соотношений (1.3), а в качестве простейшего варианта принять $a=A+B\lambda$, $b=b_0=\mathrm{const}$; $c=c_0a$, $c_0=\mathrm{const}$ или $a=A+Be^{-\alpha\lambda}$, $b=b_0=\mathrm{const}$; $c=c_0a$, $c_0=\mathrm{const}$.

Указанные предложения не следует широко обобщать. Можно по аналогии со статистической теорией пластичности, учитывающей микронапряжения [19], рассмотреть статистический вариант теории разрушения: проследить за изменением локального и среднего разрыхления, усложнить зависимость параметров от истории деформирования и т. д., т. е. пройти весь путь, который прошла в своем развитии рассматриваемая теория пластичности. Заметим, что каждое усложнение критерия должно диктоваться лишь одним требованием, что предыдущее предложение себя исчерпало и не является достаточным для практики. Надо двигаться шаг за шагом, опытными фактами и только ими, доказывая необходимость следующего приближения. Хотя уже и сейчас можно предвидеть, в каких задачах простейшие подходы (основанные на понятии одноповерхностных теорий пластичности) окажутся недостаточными.

Отметим следующее обстоятельство. Введение разрыхления в определяющее уравнение пластического течения не означает необходимости учета появившихся малых слагаемых при оценке деформированного и напряженного состояний. Более того, точность, которую обеспечивают обычные определяющие уравнения теории и пластического течения, является вполне достаточной для большинства инженерных задач. Цель публикуемой работы — сформулировать определяющее уравнение для разрыхления, показать естественность этого уравнения, а затем уже можно вновь отбросить малые слагаемые там, где это, действительно целесообразно.

2. Предлагаемое построение критерия прочности при сложном нагружении с учетом ползучести проводится в рамках теории ползучести, учитывающей микронапряжения и предложенной авторами в 1970—1978 гг. Обзор работ этого направления проведен в [19, 20].

В простейших вариантах этой теории отличие от теории пластичности состояло в том, что коэффициенты определяющих локальных законов деформирования дополнительно зависели от интенсивности скорости неупругого деформирования. Такой подход фактически сливает теорию пластичности и ползучести в единую теорию необратимых деформаций твердых тел.

Локальный закон деформирования может быть записан так:

$$\sigma_{ij}'=\tau d\varepsilon_{ij}^{p}/d\lambda+\rho_{ij}' \tag{2.1}$$

$$\rho_{ij}'+ad\rho_{ij}'/d\lambda=b\varepsilon_{ij}^{p}+cd\varepsilon_{ij}^{p}/d\lambda$$

---

[1] *Мовчан А. А.* Об одной гипотезе накопления повреждений при пластическом деформировании. Деп. в ВИНИТИ 28.07.81; № 3797-81.

где коэффициенты $a$, $b$, $c$, $\tau$, вообще говоря, зависят от $\lambda^{\cdot}$. Например: $b=0$; $a=a_0\lambda^{\cdot}$; $a_0=\mathrm{const}$; $c=c_0\lambda^{\cdot}$; $c_0=\mathrm{const}$. Проводя рассуждения, аналогичные теории пластичности, можно получить определяющее уравнение для разрыхления $d\theta/d\lambda=\beta(\rho,\lambda^{\cdot})$, $\lambda^{\cdot}=d\lambda/dt$ и считать, что локальное разрушение наступает тогда, когда $\theta$ достигает критического значения, зависящего от напряженного состояния, температуры и скорости неупругого деформирования. Если $\tau$ является величиной случайной, закон распределения которой известен, то могут быть вычислены средние значения $\langle\theta\rangle$, $\langle\varepsilon_{ij}{}^p\rangle$, $\langle\sigma_{ij}{}'\rangle$ и т. п. Например

$$\langle\varepsilon_{ij}{}^p\rangle=\int_0^\infty \varepsilon_{ij}{}^p\,d\Phi(\tau_0),\qquad \langle\theta\rangle=\int_0^\infty \theta\,d\Phi(\tau_0),\qquad \tau=f(\tau_0,\langle\lambda^{\cdot}\rangle)$$

где $\Phi(\tau_0)$ — интегральная функция распределения.

Достаточно хорошие результаты дает простейший вариант теории ползучести статистического типа [21]:

$$\sigma_{ij}{}'=\tau_0 f(\langle\lambda^{\cdot}\rangle)\,d\varepsilon_{ij}{}^p/d\lambda,\qquad \langle\varepsilon_{ij}{}^p\rangle=\int_0^\infty \varepsilon_{ij}{}^p\,d\Phi(\tau_0)$$

Рассмотрим более подробно экспериментальную трактовку величин, входящих в (2.1). Величина $\tau$, соответствующая моменту появления остаточных деформаций, определяется из опыта, причем должен быть установлен некоторый допуск, начиная с которого их следует принимать во внимание. При проведении опытов на ползучесть такая процедура лишена смысла, так как между напряжением и деформацией нет однозначной связи, поэтому представляется целесообразным рассмотреть опыты, в которых выполнено условие $\lambda^{\cdot}=\mathrm{const}$. Если для рассматриваемого материала существует такая температура $T_0$ и скорость деформирования $\lambda_0{}^{\cdot}$, то при $T\leqslant T_0$ и $\lambda^{\cdot}\geqslant\lambda_0{}^{\cdot}$ зависимостью $\tau$ от $\lambda^{\cdot}$ можно пренебречь, то в этой области изменения параметров $T$ и $\lambda^{\cdot}$ следует пользоваться соотношениями (1.1). Вне этой области $\tau$ и $\rho_{ij}$ должны определяться при $\lambda^{\cdot}=\mathrm{const}$ с тем же допуском на остаточную деформацию и таким образом $\tau$ и $\rho_{ij}$ становятся функциями $\lambda^{\cdot}$. Первые опытные данные по определению $\rho(\lambda^{\cdot})$ в простейших случаях однонаправленного и симметричного циклического деформирования показали, что функция $\rho(\lambda^{\cdot})$ является слабо возрастающей. При более сложных нагружениях оказалось, что поведение $\rho$ зависит от истории изменения скорости неупругого деформирования. Как уже упоминалось, критическое значение $\theta$ зависит от вида напряженного состояния, а именно:

$$\theta_p=\theta_0(0{,}4s/\sigma_*-1)^{m_1}\tag{2.2}$$

$$\sigma_*=\sigma_1-\nu(\sigma_2+\sigma_3),\quad \sigma_1\geqslant\sigma_2\geqslant\sigma_3$$

где $\nu$ — коэффициент Пуассона в упругой области, $\theta_0$, $s$, $m_1$ — постоянные, т. е. в момент разрушения $\theta_p$ однозначно связано с величиной разрушающего напряжения. В условиях ползучести при одноосном растяжении существует зависимость

$$\sigma_*=\sigma_1(\lambda^{\cdot})\tag{2.3}$$

Подстановка (2.3) в (2.2) дает зависимость $\theta_p$ от $\lambda^{\cdot}$, соответствующую наблюдаемой в эксперименте. Таким образом, можно ожидать, что влияние скорости деформирования на критическое значение объемного разрыхления уже присутствует в указанном критерии через зависимость $\sigma_*(\lambda^{\cdot})$ и нет необходимости считать постоянные, входящие в (2.2), также зависящими от $\lambda^{\cdot}$. Окончательный ответ на этот вопрос даст эксперимент.

Обозначая правую часть (2.2) через $m^2(\lambda^{\cdot})$, выпишем соотношения теории ползучести для одномерного случая.

Вариант теории в одномерном простейшем виде

$$\lambda^{\cdot}=\varphi(\sigma),\quad d\theta/d\lambda=2a^2(\lambda^{\cdot})\rho,\quad \theta_p=m^2(\lambda^{\cdot})\tag{2.4}$$

позволил удовлетворительно описать разрушение в условиях ползучести и ступенчатого изменения напряжений; разрушение в условиях циклического нагружения (при переходе с низкой частоты нагружения на высокую и наоборот); разрушение в условиях последовательного действия длительного и циклического нагружения.

Соответствие опытных и теоретических данных оказалось вполне приемлемым для практики. Отметим, что прямое измерение разрыхления привлекает многих исследователей и результаты работ [22, 23] находятся в соответствии со сфрмулированной теоретической схемой.

Развивая теорию разрушения в указанном направлении, целесообразно сначала остановиться на изотермических задачах, не включая зависимость параметров задачи от температуры.

Рассмотрим более подробно анализ решений соотношений (2.4). Начнем с определения времени разрушения при постоянно действующей нагрузке. Для этого случая уравнения легко интегрируются: $t_p=m_0/(b_0\varphi_0)$, $\varepsilon_p=m_0/b_0$, где $m_0$, $b_0$, $\varphi_0$ — значения $m$, $b$, $\varphi$ при $\sigma=\sigma_0$. Кроме того, из них следует, что остаточное разрыхление выражается формулой $\theta=f(\sigma)\varepsilon t$; $f=b^2\varphi$. Здесь, для простоты, принято, что $\rho=k\varepsilon$; $b^2=ka^2$. Таким образом, время разрушения определяется поведением трех функций: $m$, $b$, $\varphi$.

Остановимся на имеющихся в литературе экспериментальных данных и возможности их использования для определения неизвестных функций и сопоставления с результатами теории.

Независимо друг от друга авторы [22—24] показали, что при ползучести разрыхление монотонно изменяется и пропорционально $\varepsilon t$, в [25] утверждается, что скорость ползучести оказывает существенное влияние на рост разрыхления и критическое значение разрыхления, как правило, уменьшается с ростом скорости. Однако в настоящее время нет экспериментальных данных, из которых можно непосредственно получить необходимые функции, поэтому используем косвенные методы. Так как при ползучести $t_p=m/(b\varphi)$; $\lambda_p=m/b$, то можно определить параметры $m/b$ и $\varphi$ (при этом выяснится коррекция с кривой ползучести $\lambda^{\cdot}=\varphi$, которая может быть определена и из опытов на ползучесть). Опыт на разрушение при ступенчатом нагружении позволит выделить параметры $m$ и $b$ отдельно. Опытные данные [26] позволяют сделать предварительное заключение о том, что функция $m/b$ может иметь как монотонный, так и немонотонный характер (эта зависимость может иметь минимум). Данные, приведенные в [25, 27], показывают, что в широком диапазоне скоростей функция $b(\lambda^{\cdot})$ убывающая.

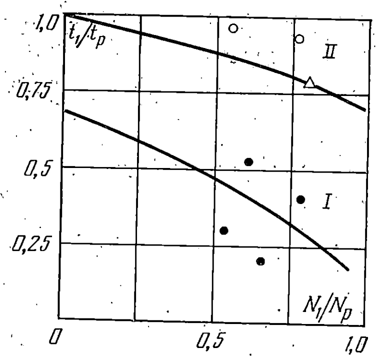
На фиг. 1 проведено сравнение теории (2.4) с результатами экспериментов [27], в которых оценивалась прочность при последовательном действии длительного и циклического нагружения. Циклическое деформирование проводилось с амплитудой напряжения, равной напряжению при длительном нагружении (материал принимался циклически стабильным). Согласно (2.4), при этом должно выполняться равенство

$$N_1/N_p+\beta^2(t_1/t_p)^2=1 \tag{2.5}$$

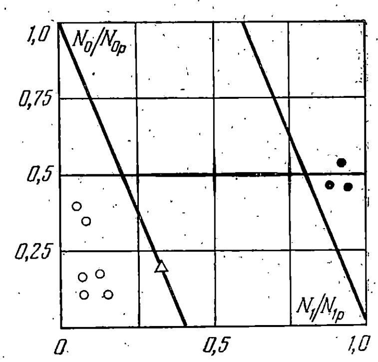
если сначала действует длительная нагрузка, и равенство

$$(t_1/t_p)^2+N_1/(\beta^2 N_p)=1 \tag{2.6}$$

если сначала приложено циклическое нагружение. Здесь $N_p$ — число циклов до разрушения, $N_1$ — выполненное число циклов, $t_p$ — время разрушения при постоянной нагрузке, $t_1$ — продолжительность действия постоянной нагрузки. Накопление разрыхления при циклической нагрузке определяется в соответствии с работой [17]. Формула (2.6) позволяет определить время разрушения образца, прошедшего предварительное циклическое нагружение, а формула (2.5) — разрушающее количество циклов для образца, имевшего предварительное растяжение. На фиг. 1 показаны кривые *1* и *2* на фоне экспериментальных точек, взятых из работы [27]. Эти кривые построены по формулам (2.5) и (2.6) при значении $\beta^2=2{,}137$, соответствующем экспериментальной точке, отмеченной на фиг. 1 звездоч-




Фиг. 1




Фиг. 2

кой. Результаты расчета хорошо согласуются с результатами опыта, если учесть, что опытам на разрушение присущ обычно значительный разброс экспериментальных точек.

Было рассчитано число циклов до разрушения при переходе с низкой частоты нагружения на более высокую и обратно при условии, что результаты одного опыта считаются известными [27].

Рабочая формула имеет вид

$$N_0/N_{0p}+m_1N_1/(m_0N_{1p})=1 \tag{2.7}$$

Соответствие с опытом следует признать хорошим (фиг. 2). Как показывает эксперимент [23, 28], отклонение от принципа линейного суммирования при ступенчатом нагружении является существенным и может иметь различный характер. Простейшие примеры отклонения результатов теории (2.4) от принципа линейного суммирования приведены в [11].

В настоящее время при оценке хрупковязкого разрушения широко используются схемы [29, 30]. Предлагаемая расчетная схема является их дальнейшим развитием применительно к сложным путям нагружения и различным видам напряженного состояния. Необходимость присутствия в критерии разрушения предельной величины пластического разрыхления подтверждается экспериментально, поэтому описание процесса разрушения твердых тел должно естественно сводиться к совместному рассмотрению уравнений необратимого деформирования твердого тела с условием достижения разрыхлением критического значения. При этом необходимо учитывать влияние скорости деформирования, напряженного состояния и температуры на предельное разрыхление.

В этой связи представляют интерес недавно опубликованные работы [31, 32], результаты которых не противоречат схеме, предлагаемой в данной работе. В [31] утверждается, что дифференциальное уравнение для «повреждения» должно содержать в явном виде максимальное нормальное и касательное напряжения, т. е. $d\omega/dt=f(\sigma_1, \sigma_i, \omega)$.

В [32] утверждается, что существует два механизма разрушения, взаимно влияющих друг на друга.

Определяющие уравнения кинетических уравнений повреждаемости записываются так:

$$d\omega_1/dt=f_1(\omega_1, \omega_2, \sigma), \quad d\omega_2/dt=f_2(\omega_1, \omega_2, \sigma)$$

и разрушение происходит при достижении $\omega_1$ или $\omega_2$ критического значения.

Такая точка зрения вполне допустима и заслуживает внимания. Схема, излагаемая в данной работе, может быть дополнена соображениями, высказанными в [31, 32], если эксперимент подтвердит необходимость этого. Отметим, что в недавно опубликованной работе [33] предложено использовать структурную модель среды для конкретизации параметров кинетического уравнения прочности. Интересные соображения об учете эффекта залечивания высказаны в работе [34].

Не следует ожидать, что предлагаемая схема решает всю совокупность задач теории разрушения при сложном нагружении, однако, по-видимому, она охватывает основные черты этих процессов. Насущной проблемой в настоящее время является осуществление целенаправленных экспериментов, таких, как эксперименты по изучению поверхностей текучести в условиях ползучести (нагружение с малыми постоянными скоростями деформирования и разрушения при скачкообразном изменении скоростей деформирования).

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Новожилов В. В.* О пластическом разрыхлении.— ПММ, 1965, т. 29, вып. 4, с. 681—689.
2. *Новожилов В. В., Рыбакина О. Г.* Перспективы построения критерия прочности при сложном нагружении.— Инж. ж. МТТ, 1966, № 5, с. 103—111.
3. Пластичность и разрушение/Под ред. *В. Л. Колмогорова*. М.: Металлургия, 1977. 336 с.
4. *Угодчиков А. Г., Коротких Ю. Г.* Уравнения теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением.— В кн.: Уравнения состояния при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1981, с. 129—167.
5. *Махутов Н. А., Левин О. А.* Уравнения состояния и расчеты на малоцикловую прочность.— В кн.: Уравнения состояния при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1981, с. 5—24.
6. *Бондарь В. С., Горохов В. Б., Санников В. М.* Исследование малоцикловой прочности оболочек вращения при сложном теплосиловом нагружении.— Прикладные проблемы прочности и пластичности: Механика деформируемых систем: Сб. статей. Горький: Изд-е Горьк. ун-та, 1979, вып. 12, с. 120—126.
7. *Вакуленко А. А., Литов Ю. Н., Чебанов В. М.* О разрыхлении структуры и прочности полимерных материалов.— Докл. АН СССР, 1967, т. 175, № 3, с. 539—541.
8. *Хажинский Г. М.* О теории ползучести и длительной прочности металлов.— Изв. АН СССР, МТТ, 1971, № 6, с. 29—36.
9. *Волков В. М.* Об учете остаточной дилатации металлов в теории пластичности и ползучести.— В кн.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький: Изд-е Горьк. ун-та, 1977, вып. 7, с. 24—28.
10. *Арутюнян Р. А.* О критериях разрушения в условиях ползучести.— Проблемы прочности, 1982, № 9, с. 42—45.
11. *Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И., Рыбакина О. Г.* Разрыхление и критерий разрушения в условиях ползучести.— Докл. АН СССР, 1983, т. 270, № 4, с. 831—835.
12. *Рыбакина О. Г., Сидорин Я. С.* Экспериментальное исследование закономерностей пластического разрыхления металлов.— Инж. ж. МТТ, 1966, № 1, с. 120—124.
13. *Рыбакина О. Г.* Феноменологическое описание разрушения металлов при некоторых видах асимметричного деформирования.— Изв. АН СССР. МТТ, 1969, № 6, с. 61—66.
14. *Кадашевич Ю. И., Новожилов В. В.* Теория пластичности, учитывающая эффект Баушингера.— Докл. АН СССР, 1957, т. 117, № 4, с. 586—588.
15. *Кадашевич Ю. И.* О различных вариантах тензорно-линейных соотношений в теории пластичности.— В кн.: Исследования по упругости и пластичности. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967, вып. 6, с. 39—45.
16. *Рыбакина О. Г.* Феноменологическое описание малоцикловой усталости металлов в условиях концентрации напряжений.— В кн.: Проблемы механики твердого деформируемого тела. Л.: Судостроение, 1970, с. 375—380.
17. *Рыбакина О. Г.* Феноменологическая теория малоцикловой усталости.— В кн.: Актуальные проблемы нелинейной механики сплошных сред. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977, вып. 1, с. 104—131.
18. *Бахвалова Н. А.* Об учете влияния накопленной поврежденности на процесс разрушения в области малоцикловой усталости.— Изв. АН СССР. МТТ, 1975, № 2, с. 143—147.
19. *Кадашевич Ю. И., Новожилов В. В.* Об учете микронапряжений в теории пластичности.— Инж. ж. МТТ, 1968, № 2, с. 82—91.
20. *Кадашевич Ю. И., Новожилов В. В.* Теория пластичности и ползучести металлов, учитывающая микронапряжения.— Изв. АН СССР. МТТ, 1981, № 5, с. 99—110.
21. *Кадашевич Ю. И., Новожилов В. В.* Обобщенная теория упрочнения.— Докл. АН СССР, 1980, т. 254, № 5, с. 1095—1098.
22. *Greenwood G. W.* Fracture under creep conditions.— Mater Sci. and Eng., 1976, v. 25, p. 241—243.
23. *Вудфорд Д. А.* Повреждение при ползучести и концепция остаточной долговечности.— Теорет. основы инж. расчетов, 1979, т. 101, № 4, с. 1—8.
24. *Gittins A.* The kinetics of cavity growth in 20 Cr/25 Ni stainless steel.— J. Mater. Sci., 1970, v. 5, No. 3, p. 223—232.
25. *Dyson B. F., McLean D.* New method of predicting creep life.— Metal. Sci. J., 1972, v. 6, No. 3, p. 220—223.
26. *Станюкович А. В.* Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов. М.: Металлургия, 1967. 199 с.

27. *Леметр Дж., Пламтри А.* Применение понятия поврежденности для расчета разрушения в условиях одновременной усталости и ползучести.— Теорет. основы инж. расчетов, 1979, т. 101, № 3, с. 124–134.
28. *Одинг И. А., Иванова В. С., Бурдукский В. В., Геминов В. Н.* Теория ползучести и длительной прочности металлов. М.: Металлургия, 1959. 488 с.
29. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
30. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
31. *Чижик А. А., Петреня Ю. К.* О кинетических уравнениях повреждаемости при оценке ресурса и надежности материалов в условиях ползучести.— Тр. ЦКТИ, 1982, вып. 194, с. 27–37.
32. *Локощенко А. М., Шестериков С. А.* К проблеме оценки длительной прочности при ступенчатом нагружении.— ПМТФ, 1982, № 2, с. 139–143.
33. *Кононов К. М., Порошин В. Б., Садаков О. С.* К описанию усталостного повреждения материала при неупругом нагружении с выдержками.— Проблемы прочности, 1982, № 7, с. 23–26.
34. *Москвитин В. В.* Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.

Ленинград

Поступила в редакцию
8.VII.1985