УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 11. Структурные параметры деформационного старения при высокотемпературном малоцикловом разрушении.

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва
alrom37@mail.ru

Аннотация. *Показано, что при расчете долговечности в условиях протекания процессов интенсивного деформационного старения (что свойственно большому классу сталей при эксплуатационных температурах) и при разработке методов экстраполяции прочностных и пластических свойств на длительные времена могут быть использованы структурные характеристики, изменение которых отражает физические процессы, протекающие в материале под действием нагрузки.*

Ключевые слова: *циклическое нагружение, форма цикла, частота нагружения, деформационное старение, карбидные частицы, упругопластическое деформирование, высокие температуры, временные выдержки, длительное статическое нагружение, двухчастотное нагружение, ширина петли гистерезиса, накопление деформаций, размер частиц, расстояние между частицами.*

Materials science problems in mechanics of deformation and destruction at a stage of formation of cracks
Part 11. Structural deformation parameters of ageing in high-temperature low-cycle loading

A.N. Romanov
IMASH RAS, Russia, Moscow

Abstract*. It is shown that, when calculating the durability in the face of intense deformation aging process flow (that is characteristic of a large class of steels with operating temperatures) and in developing methods of extrapolation of strength and plastic properties for long times of structural characteristics can be used, which reflects the physical processes occurring in the material under the action of load.*

Key words: *cyclic loading, cycle form, loading frequency, deformation aging, carbide particles, elasto-plastic deformation, high temperatures, temporary excerpts, long static loading, two-frequency loading, hysteresis loop width, accumulation of deformations, diameter of the particles, the distance between the particles.*

Как было показано ранее [1-10], при циклическом упругопластическом деформировании конструкционных материалов происходит постепенное накопление повреждений, кинетика и предельное состояние (образование трещин) которых оценивается деформационно-кинетическим критерием, при этом в материале происходят значительные структурные изменения с образованием различных деформационных микрорельефов на поверхности испытываемого образца. При этом в материалах может протекать деформационное старение [10], особенно в условиях высокотемпературного нагрева. Многие конструкционные материалы имеют температурный интервал, в котором особенно активно проявляется эффект деформационного старения, проявляющийся в выпадении частиц (например, карбидных). Выпадение частиц, как правило, сопровождается упрочнением материала: повышается предел текучести и уменьшается ширина петли гистерезиса с ростом числа циклов нагружения. Изменение характеристик требует уточнения параметров расчетных показателей при расчетах на циклическую прочность элементов конструкций.

Для оценки разрушающего числа циклов в условиях жесткого нагружения (нагружение с заданным размахом упругопластической деформации в циклах) известна модифицированная зависимость Лангера-Мэнсона в виде

$$\bar{e}_a = \frac{1}{e_т(4N^{m_e} + (1+r_e)/(1-r_e))} \ln \frac{100}{100 - \psi_{k_0}(\tau_0/(N_0\tau_ц^э))^{m_{\psi k}}} +$$

$$+ \frac{K_{-1}\sigma_{b_0}(\tau_0/(N_0\tau_ц^э))^{m_{\sigma b}}}{e_т E[1 + K_{-1}(1+r_e)/(1-r_e)]}, \qquad (1)$$

где $\bar{e}_a$ - относительная величина амплитуды упругопластической деформации (деформация отнесена к деформации $e_т$ на предел пропорциональности, определенный в нулевом полуцикле); r_e – коэффициент асимметрии цикла деформаций; σ_{b0} – предел прочности при кратковременном статическом разрушении; K_{-1} – коэффициент, равный отношению предела выносливости σ_{-1} на базе $N_p=10^6$ циклов к пределу прочности σ_b; E – модуль упругости для данной температуры испытания; m_e – показатель степени, зависящий от свойств стали и в большинстве случаев принимаемый равным 0,5; N_0 – число циклов до образования трещины; τ_0 – время испытаний до разрушения при кратковременном статическом нагружении; $\tau_ц^э$ - эквивалентное по повреждаемости время циклического нагружения; $m_{\sigma b}$ и $m_{\psi k}$ - параметры кривой длительной прочности и пластичности данной стали, которые зависят от температуры испытания.

Влияние высоких температур и времени деформирования τ учитывается введением в уравнение (1) характеристик пределов прочности σ_b и пластичности ψ_k через уравнения

$$\sigma_b = \sigma_{b_0}(\tau_0/\tau)^{m_{\sigma b}}, \qquad (2)$$

$$\psi_k = \psi_{k_0}(\tau_0/\tau)^{m_{\psi k}}, \qquad (3)$$

где τ – время на рассматриваемом ресурсе.

При мягком нагружении в условиях концентрации напряжений разрушающее число циклов предлагается определять по зависимости

$$\bar{e}_a = \frac{A}{4}\frac{\alpha_\sigma^2(1-\tau_\sigma)}{e_т N_0^{m_\sigma}}\ln\frac{100}{100-\psi_b} + \frac{K_{-1}\sigma_b}{e_т E[1+K_{-1}((1+r_\sigma)/(1-r_\sigma))]}, \quad (4)$$

где A – параметр диаграммы циклического деформирования; α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; ψ_b – относительное равномерное сужение при статическом растяжении; r_σ – коэффициент асимметрии напряжений; m_σ – структурная характеристика материала.

Характеристики материала A, ψ_b и m_b зависят от механических характеристик материала: предела прочности и предела текучести:

$$A = 0{,}16\left(1+\frac{1}{1-\sigma_{0,2}/\sigma_b}\right), \quad (5)$$

у, (6)

$$m_b = \left(1{,}2\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} - 0{,}35\right)\frac{1-r_\sigma}{2}. \quad (7)$$

По аналогии с зависимостями (2) и (3) может быть определено и изменение предела текучести $\sigma_{0,2}$ в зависимости от времени нагружения:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,20}(\tau_0/\tau)^{m_{0,2}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{0,20}$ – предел текучести при кратковременном статическом нагружении; $m_{0,2}$ – структурная характеристика материала, определяемая как

$$m_{0,2} = m_{\sigma_b}\frac{\lg(\sigma_{0,20}/\sigma_b^*)}{\lg(\sigma_{b0}/\sigma_b^*)}, \quad (9)$$

где σ_b^* - сопротивление разрушению при длительном нагружении.

Видно, что в зависимостях (2) и (4) учет изменения структурного состояния предлагается осуществлять посредством введения параметров, характеризующих изменение предела текучести материала при циклическом нагружении.

Как отмечалось выше, структурные изменения, вызванные деформационным старением, приводят к изменению механических и пластических свойств материала, и в частности такой структурно чувствительной характеристики, каковой является предел пропорциональности (текучести) [10-14]. Причем интенсивность изменения зависит от вида нагружения и формы цикла.

Экспериментально определенные по диаграммам деформирования при мягком нагружении относительные величины циклического предела текучести (рис.1) следует, что величины циклических пределов текучести для стали Х18Н10Т при T = 650^{0}С увеличиваются в процессе циклического упругопластического деформирования в среднем на 40-60%, и при этом наибольшее их увеличение имеет место в условиях одночастотного нагружения, а

наименьшее – двухчастотного. Отмеченные закономерности соответствуют и характеру изменения ширины петли гистерезиса при соответствующих формах цикла и уровнях нагружения [10].

Известно также, что и для конструкционного материала, содержащего равномерно распределенные частицы второй фазы, предел текучести материала определяется напряжением, необходимым для свободного движения дислокаций. При этом он может быть рассчитан по зависимости вида

$$\sigma_{т} = KG(d/l)^3, \qquad (10)$$

где G – модуль сдвига; d – диаметр частиц второй фазы; l – расстояние между частицами; K – постоянная, которая для структуры с частицами второй фазы

размером 100-1000 $\dot{A}$ близка к 0,3.

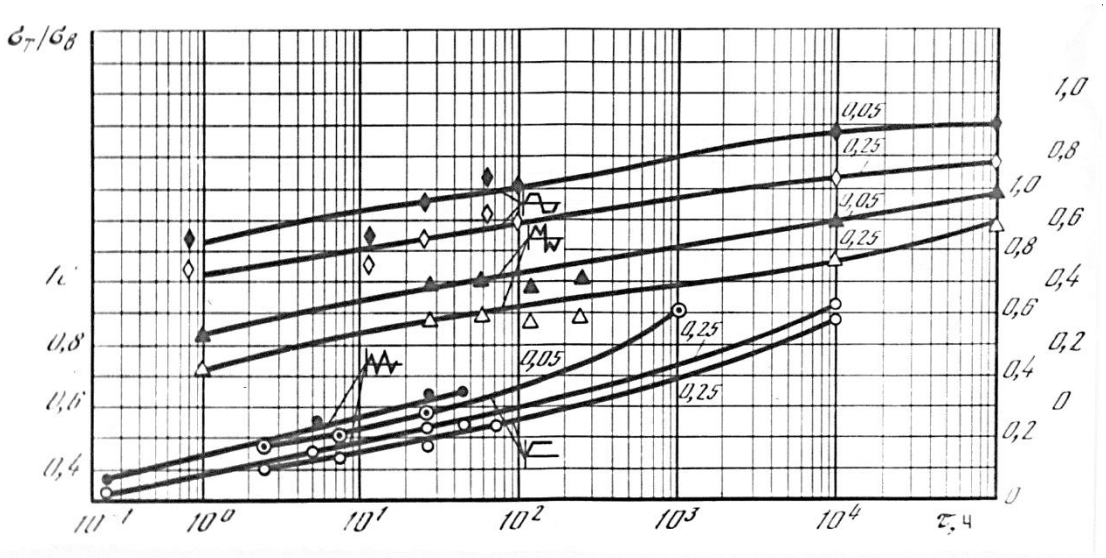


Рис.1. Изменение относительного предела текучести стали Х18Н10Т

в зависимости от формы цикла (T = 650^{0}С)

Принимая $\sigma_{т} = \sigma_{0,2}$ с учетом (5), зависимости (5-7) могут быть записаны через структурные характеристики в виде

$$A = 0{,}16\left(1 + \frac{\sigma_b}{\sigma_b - KG(d/l)^3}\right), \qquad (11)$$

$$\psi_b = \psi_k \frac{\sigma_b - KG(d/l)^3}{\sigma_b(1+1{,}4(\psi_k/100)) - KG(d/l)^3}, \qquad (12)$$

$$m_b = \left(1{,}2\frac{KG(d/l)^3}{\sigma_b} - 0{,}35\right)\frac{1-r_\sigma}{2}. \qquad (13)$$

На основе проведенных структурных исследований [10,11, 14] были получены основные закономерности изменения размера и плотности частиц в зависимости от времени (числа циклов) нагружения и формы цикла. При проверке зависимости (5) для случая малоциклового нагружения сопоставление рассчитанных данных осуществлялось с экспериментально определенными пределами пропорциональности ($\sigma_{0,05}$) и текучести ($\sigma_{0,2}$), а также с результатами, рассчитанными по зависимости (8). Полученные значения $\sigma_т$ по структурным характеристикам (в виде d/l) использовались затем для расчета структурных параметров A, ψ_b и m_σ кривых разрушений, описываемых уравнениями (11-13). Причем в этом случае величина ψ_k для заданной долговечности определялась по зависимости (3), а σ_b принималась равной амплитуде напряжения, характеризующей максимальное разрушающее напряжение (по аналогии с заданными напряжениями при длительном статическом нагружении); ψ_{k0} – пластичность материала, которая определялась при кратковременном однократном разрушении. Как видно из рис. 2, характеристика карбидообразования для всех случаев нагружения изменяется по экспоненциальной зависимости.

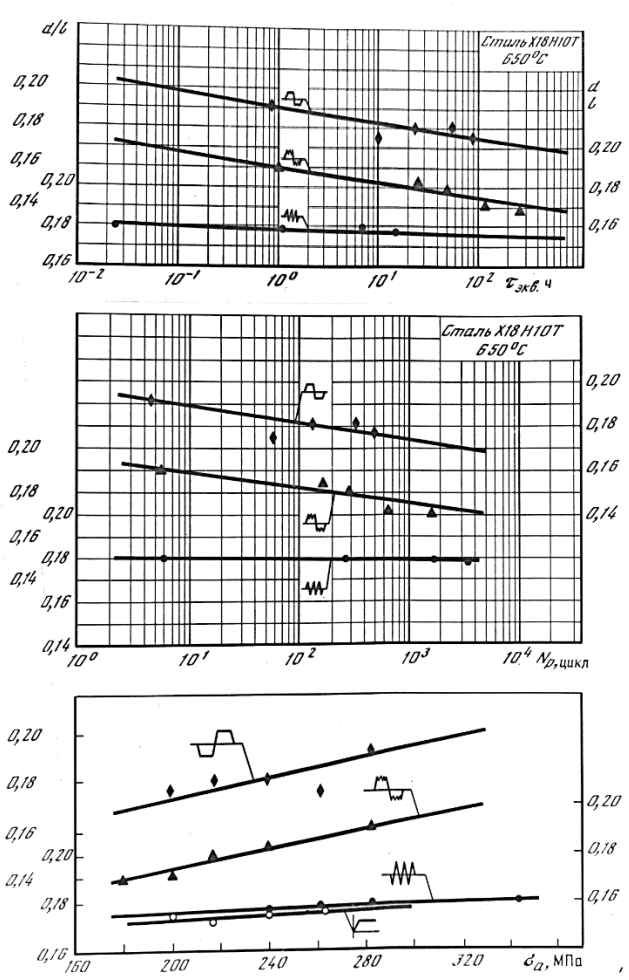


Рис. 2. Зависимость структурной характеристики от времени нагружения и формы цикла для стали Х18Н10Т (650^0С)

Чтобы получить соответствующие значения *d/l* и по ним произвести приближенную оценку структурных параметров и предела текучести материала при длительных сроках службы, а также сопоставить их с характеристиками, определяемыми по эмпирическим зависимостям (8) и (9), кривые на рис. 2,а были экстраполированы на времена 10^3 – 10^5 ч. При этом предполагалась неизменность закона изменения отношения *d/l* во времени.

Линейная зависимость *d/l* наблюдалась не только от времени нагружения (фактического и эквивалентного), но и от амплитуды напряжения (рис. 2,б) и разрушающего числа циклов. Причем во всех случаях самое слабое изменение во времени и по напряжениям параметра *d/l* имело место при одночастотном симметричном и при длительном статическом нагружениях. При двухчастотном и программном (с выдержками) нагружениях изменение *d/l* было практически одинаковым и существенно более интенсивным, чем при моногармоническом и длительном статическом нагружениях (рис. 2). для последних случаев нагружения изменение параметров *d/l* было практически одинаковым в зависимости от напряжения (рис. 2,б).

Расчет $\sigma_т$ по зависимости (10) показал, что получаемые при этом значения $\sigma_т$ хорошо согласуются (рис. 5.18, кривые 3, 5, 7, 9) с экспериментально определенными средними значениями циклического предела пропорциональности $\sigma_{0,05}$ (с допуском на пластическую деформацию 0,05%) при *K*, равном 0,3, как и в исходной зависимости (5.21). Данные расчета $\sigma_т$ по уравнению (5.21) хорошо согласуются со значениями $\sigma_{0,2}$, определенными по зависимости (5.19), если в уравнении (5.21) *K* принимается равным 0,2, а время статического разрушения – 0,05 ч. Если взять в расчет фактическое для данного эксперимента время однократного разрушения τ_0 = 0,025 ч, то соответствующая кривая располагается между расчетной кривой и определенной экспериментально для $\sigma_{0,2}$. Хорошее согласование экспериментальных и рассчитанных по зависимостям (5.19) и (5.21) данных наблюдалось для всех случаев нагружения (рис. 5.18).

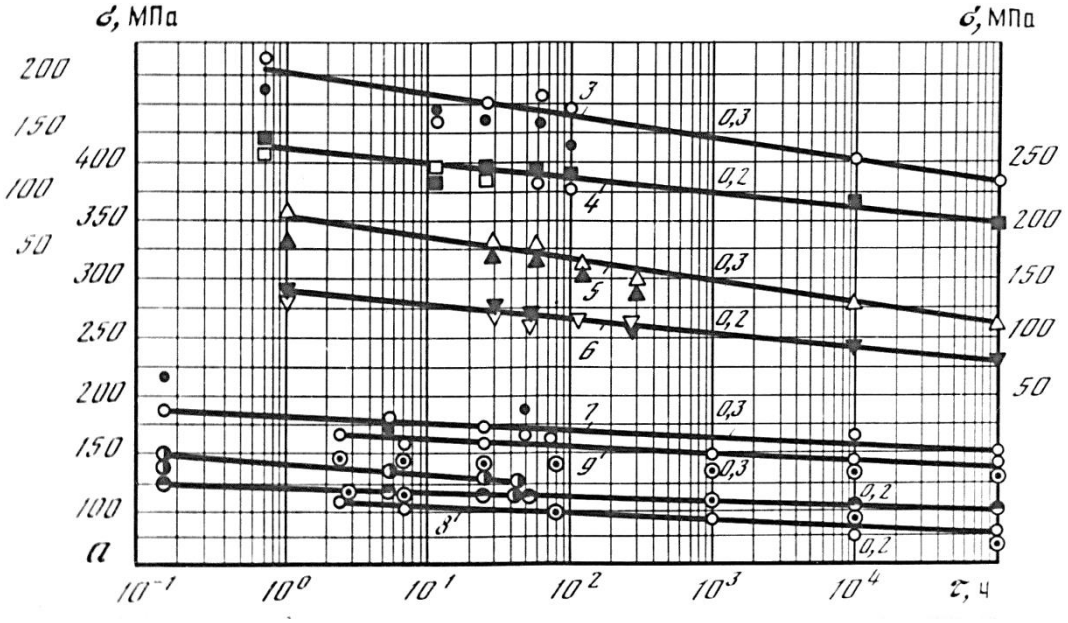
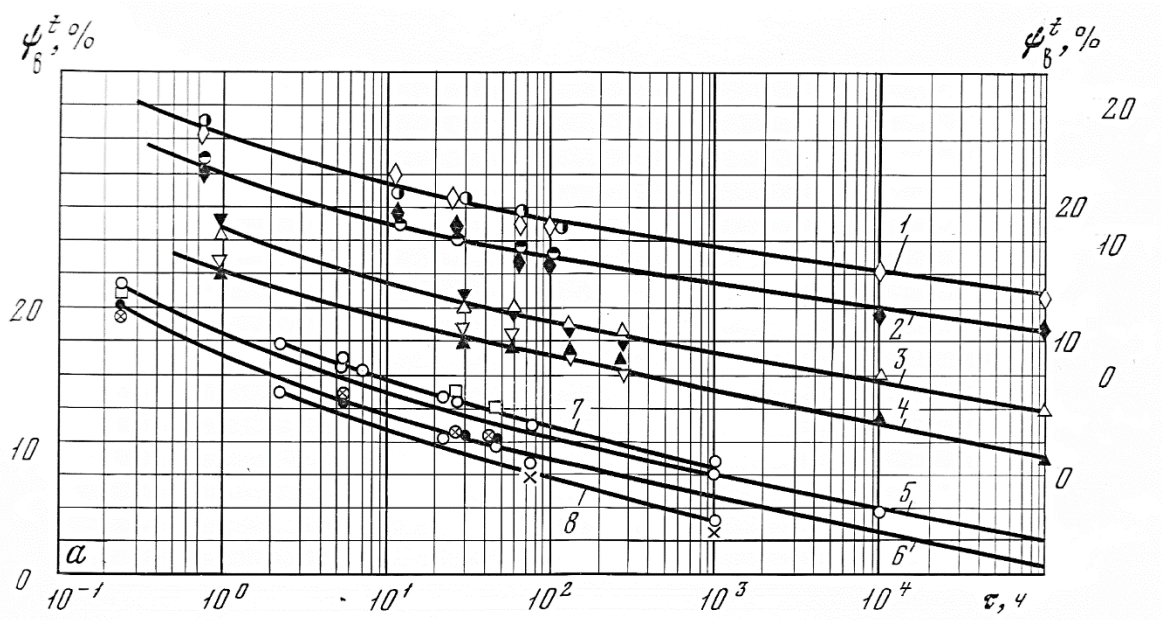


Рис. 3. Сопоставление рассчитанных значений пределов пропорциональности (текучести) для стали Х18Н10Т в зависимости от формы цикла

Как видно из рис. 3,а, пределы текучести уменьшаются с увеличением времени нагружения, причем наиболее интенсивным это уменьшение проявляется для случаев двухчастотного и программного (с выдержками) нагружений (кривые 4, 7 на рис. 3,а). Интенсивность уменьшения пределов текучести для моногармонического и циклического нагружений практически одинакова (кривые 1-3, 8, 9 на рис. 3,а).

Однако, хотя $\sigma_т$ со временем и уменьшается, в связи с тем, что σ_b, подсчитанное по зависимости (2), уменьшается более интенсивно (рис. 2), чем $\sigma_т$, то отношение $\sigma_т/\sigma_b$ со временем непрерывно возрастает, причем наиболее интенсивно для случаев одночастотного и длительного статического нагружений. Поперечное сужение (как равномерное, так и при окончательном разрушении) непрерывно снижается с ростом времени нагружения (рис. 4). Из рис4 следует также, что результаты определения ψ_b по структурной характеристике d/l (уравнение (12)) как при $\tau = 0{,}25$, так и при $\tau_0 = 0{,}05$ ч, хорошо совпадают с данными расчета по зависимости (8), если в последней принимается также соответственно $\tau_0 = 0{,}25$ и $\tau_0 = 0{,}05$ ч.



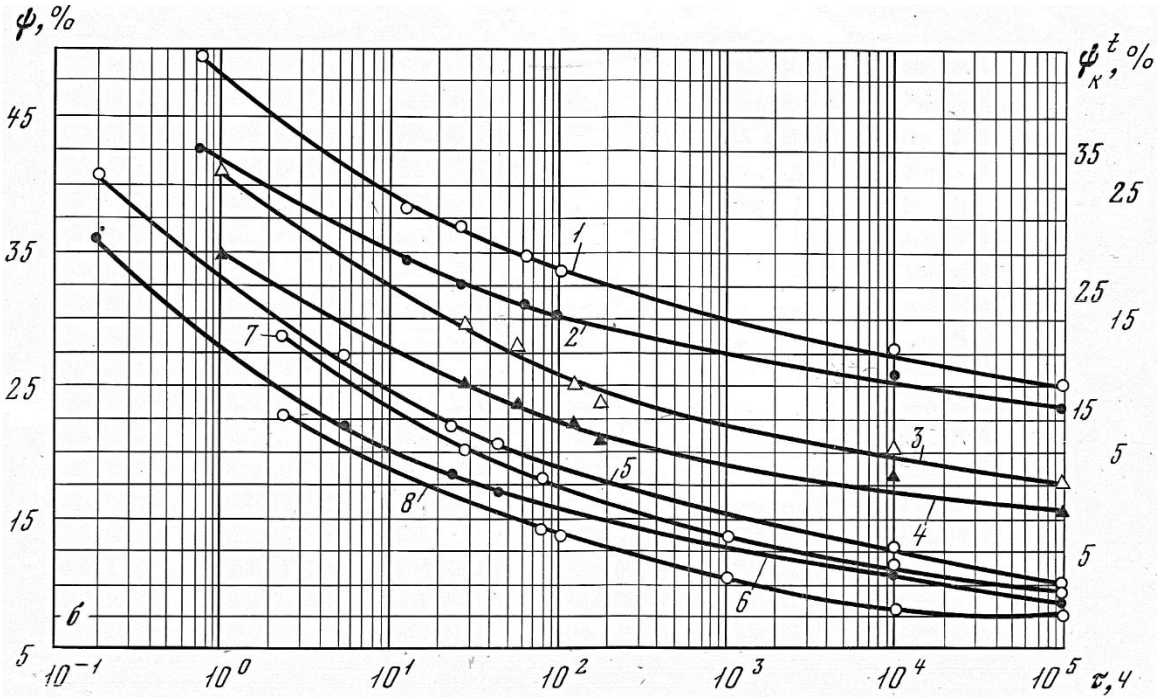


Рис. 4. Сопоставление рассчитанных значений пластичности

стали Х18Н10Т в зависимости от формы цикла

Если сравнить характер убывания равномерного поперечного сужения (рис. 4,а) и сужения при окончательном разрушении (рис. 4,б), то видно, что интенсивность убывания со временем предельного равномерного сужения ψ_b ниже, чем при малых ресурсах (до 10^3 ч). При долговечностях более 10^3 ч падение остаточной пластичности ψ_k замедляется с увеличением времени нагружения. Причем так же, как и для других характеристик (σ_b, $\sigma_{0,2}$), интенсивность изменения пластичностей ψ_k и ψ_b выше при нагружении с выдержками на экстремальных уровнях нагрузки (как с наложением нагрузки второй частоты, так и при отсутствии последней). Для структурных параметров $m_{\sigma 0,2}$ и $A_{0,2}$ относительный характер их изменения со временем сохраняется: временные выдержки в большей мере интенсифицируют структурные изменения по сравнению с одночастотным и длительным статическим нагружениями. Определение этих структурных параметров по

структурной характеристике d/l хорошо согласуется с данными расчета по зависимостям (5) – (8). При этом следует отметить, что для A при больших долговечностях имеет место более сильно выраженная зависимость от времени. Однако надо иметь в виду, что принятый здесь метод экстраполяции d/l на времена до 10^5 ч основан лишь на том, что зависимости (5) – (8) также предполагают монотонное изменение характеристик во времени, определяемых по механическим свойствам материала $\sigma_{0,2}$ и σ_b.

Проведенные исследования материала в зонах разрушения после длительного статического нагружения (40 тыс. и 100 тыс. час.) показывают, что при указанных длительностях нагружения пределы текучести, подсчитанные по структурному параметру d/l

в соответствии с зависимостью (8), существенно отклоняются от кривой линейной экстраполяции (пунктир на рис.5) и на кривой изменения $\sigma_т$ наблюдается перелом при времени нагружения около 10^3 час. Это обстоятельство свидетельствует о том, что при работе материала в интервале температур интенсивного деформационного старения линейная экстраполяция прочностных и пластических свойств может дать существенную погрешность. Вместе с тем видно, что при экстраполяции свойств материала на длительные времена могут быть использованы структурные параметры, формирующие прочностные и пластичные свойства материала, а в тех случаях, когда известен определяющий параметр (например, как в рассмотренном случае), он может быть использован для указанных целей.

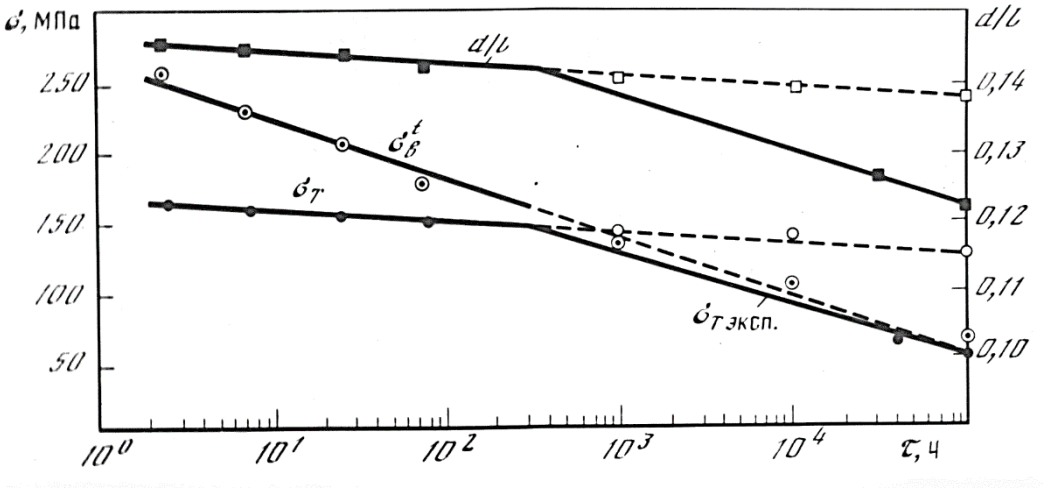


Рис. 5. Изменение пределов текучести, прочности и структурного параметра d/l стали Х18Н10Т при длительном статическом нагружении (T = 650^{0}С)

Для материалов другого класса и других условий нагружения, когда процесс деформационного старения не проявляется или проявляется слабо, наиболее представительными могут оказаться иные структурные характеристики (наличие второй фазы, например перлита в перлитных сталях, блочность структуры, дислокационная структура и пр.).

Таким образом, при оценке долговечности в условиях протекания интенсивного деформационного старения (что свойственно большому классу сталей при эксплуатационных температурах) и при разработке методов экстраполяции прочностных и пластических свойств на длительные времена могут быть использованы структурные характеристики, изменение которых отражает физические процессы, протекающие в материале под действием нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1. Вестник научно-технического развития, №11, 2013, с.38-49.

2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование. Вестник научно-технического развития, №1, 2014, с.37-54.

3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения. Вестник научно-технического развития, № 2, 2014, с.36-50.

4. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 4. Основные типы микроструктурных деформационных рельефов, образующихся в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения. Вестник научно-технического развития, №3, 2014, с.31-58.

5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов. Вестник научно-технического развития. №9, 2014, с.10-30.

6. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 6. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов. Вестник научно-технического развития, № 3, 2015, с. 32-41.

7. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении. Вестник научно-технического развития, № 5, 2015, с.15-24.

8. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 8. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном нагружении конструкционных материалов. Вестник научно-технического развития, № 6, 2015, с.31-39.

9. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов. Вестник научно-технического развития, № 12, 2015, **с**.

10. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 10. Сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала. Вестник научно-технического развития, № 1, 2016, **с.**

11. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.

12. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М., Наука. 1988, 280 с.

13. Романов А.Н., Гаденин М.М. Исследование процесса деформирования при малоцикловом нагружении. Проблемы прочности. 1971, № 11, с. 13.

14. Лозинский М.Г., Романов А.Н., Малов В.В. Структурные изменения аустенитной стали в связи с условиями малоциклового нагружения. Практика тепловой микроскопии. М. Наука, 1976, с. 67-72.

Дата поступления статьи: 29 февраля 2016 года.