

УДК 621.539.43.001.24

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН**

**Часть 12. Кинетика истинных напряжений и деформаций
при малоцикловом нагружении.**

© Александр Никитович Романов

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

Аннотация: Выполнен анализ кинетики истинных напряжений и деформаций при циклическом упругопластическом деформировании конструкционных металлических материалов в условиях мягкого и жесткого нагружения.

Ключевые слова: циклическое нагружение, упругопластическое деформирование, истинные напряжения и деформации.

**MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION
AND DESTRUCTION AT A STAGE OF FORMATION OF CRACKS
Part 12. Kinetics of true stresses and deformations at low-cyclic loading.**

A.N. Romanov

IMASH RAS, Russia, Moscow
alrom37@mail.ru

Abstract.: The analysis of kinetics of true tension and deformations at cyclic elasto-plastic deformation of constructional metal materials in the conditions of soft and rigid loading is made.

Key words: cyclic loading, elasto-plastic deformation, true tension and deformations.

Как было показано ранее [1-11], в процессе циклического нагружения в условиях мягкого (с заданной амплитудой нагрузки) и жесткого (с заданным размахом упругопластической деформации) нагружения развитие деформаций протекает неоднородно, обусловленное структурной неоднородностью материала.

Наряду с этим имеет место и неоднородность напряженного состояния с ростом числа циклов нагружения, вызванная упрочнением материала и изменением сечения образца при накоплении деформаций в условиях мягкого нагружения, когда уровень нагрузки в циклах поддерживается постоянным.

На практике аналитическое описание изменений деформаций, как правило, ведется через условные напряжения (усилия, отнесенные к исходному сечению). Фактически же, в особенности при мягком нагружении, в области квазистатического и смешанного типов разрушения вследствие образования шейки истинные деформации и напряжения, как будет показано ниже, могут существенно отличаться от условных напряжений в цикле [12].

Истинные напряжения и деформации в полупериодах определяются как

$$\sigma_{\text{ист}} = P / F_{\text{ист}}, \quad (1)$$

$$e_{\text{ист}}^{(k)} = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (2)$$

где P – усилие, приложенное к образцу; $F_{\text{ист}}$ – действительная площадь сечения образца; ψ_k – относительное поперечное сужение образца в k -м полуцикле.

Как видно из рис. 1, для стали ТС при мягком нагружении происходит непрерывное увеличение истинных деформаций и напряжения в циклах. Причем при одинаковых уровнях пластической деформации в цикле наблюдается снижение напряжения. Однако максимальные напряжения в цикле вследствие роста истинных деформаций (непрерывно увеличивается шейка) с увеличением числа циклов нагружения (рис. 1,а).

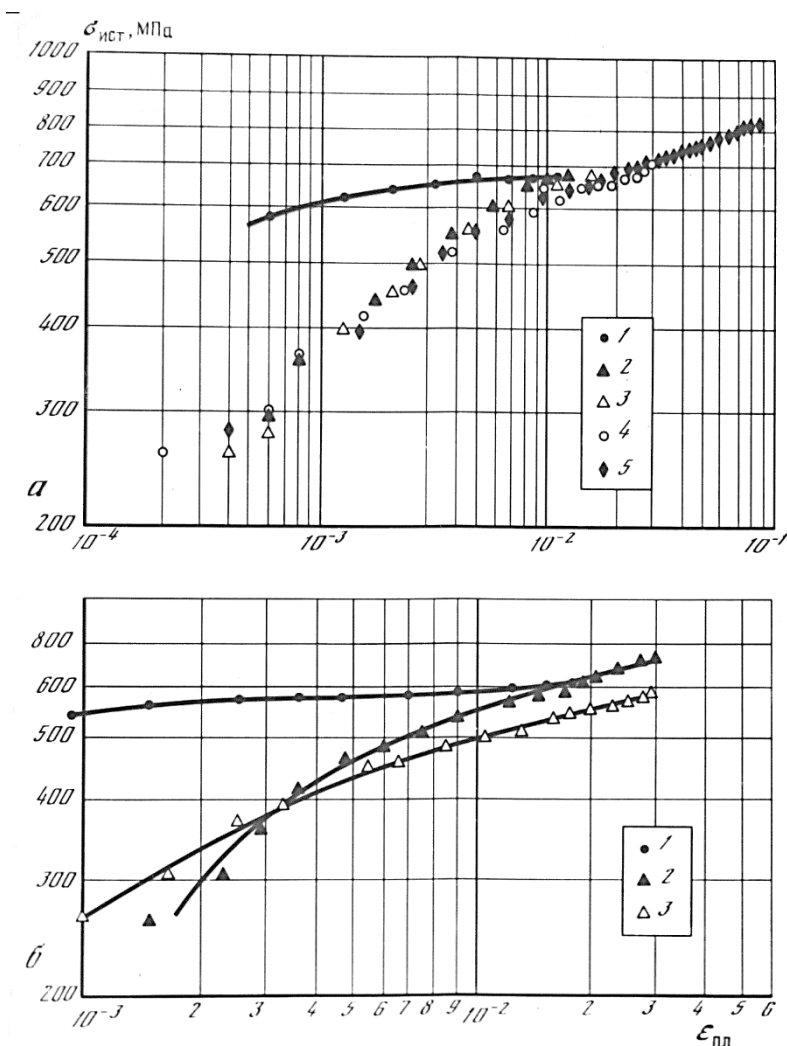


Рис. 1. Кинетика истинных деформаций и напряжения в полуциклах растяжения при циклическом нагружении разупрочняющейся стали ТС

а – мягкое нагружение: 1 – $k = 0$, 2 – $k = 2$, 3 – $k = 20$, 4 – $k = 48$, 5 – $k = 76$;

б – жесткое нагружение: 1 – $k = 0$, 2 – $k = 2$, 3 – $k = 400$

Для данных условий нагружения ($\sigma_a = 660$ МПа) уже в 20-м полуцикле ($k = 20$) истинные деформации увеличиваются примерно в 1,4 раза по сравнению с нулевым полуциклом ($k = 0$); при $k = 48$ и $k = 76$ они возрастают соответственно в 2,6 и 8 раз, в то время как ширина петли изменяется за указанные полуциклы соответственно в 1,1; 2,4 и в 7 раз. При этом прирост истинных максимальных напряжений для данных полуциклов нагружения составлял: с 670 МПа (при $k = 0$) до 680 МПа (при $k = 20$), 708 МПа (при $k = 48$) и 820 МПа

(при $k = 76$), т.е. максимальное увеличение напряжения составляло около 21,5% (или 23% по отношению к условному напряжению, используемому для построения кривой усталости и в расчетах).

При жестком нагружении для разупрочняющейся стали ТС характерно повышение истинных напряжений в нескольких первых циклах, как это показано для второго полупериода на рис. 1,б с дальнейшим их падением ($k = 400$). Жесткое нагружение всегда заканчивается разрушением усталостного типа, (без образования шейки с возникновением и развитием на определенной стадии нагружения трещины усталости). На рис. 1,б приведенные кривые изменения напряжений жесткого нагружения для всех материалов относятся к моменту до образования трещины.

В этом случае для жесткого нагружения стали ТС наблюдалось максимальное изменение (уменьшение) истинных напряжений от 2-го до 400-го полупериодов (около половины долговечности, $N_p = 360$ циклов) на 22%, т.е. изменения напряжений при жестком нагружении до образования трещины соизмеримы с изменениями истинных напряжений при мягком нагружении в интервале квазистатического типа разрушения.

Для упрочняющегося алюминиевого сплава АД-33 характерно непрерывное уменьшение накопленной деформации и ширины петли с ростом числа циклов мягкого нагружения (рис. 2,а). Образец, долговечность которого составила 30 циклов, имел увеличение истинных напряжений от нулевого до 44-го полупериода всего лишь на 7,6% (с 340 до 360 МПа). При этом ширина петли в указанном полупериоде уменьшалась в 5,9, а истинная деформация – в 5,6 раза. Столь малая разница по сравнению с разупрочняющимися материалами объясняется прежде всего тем, что материалы типа АД-33 обладают малым запасом пластичности и их разрушение даже при малых долговечностях, как правило, имеет усталостный характер. Образующаяся при данных условиях испытания шейка невелика и определяет лишь незначительные увеличения истинных напряжений по сравнению с условными.

При жестком нагружении упрочняющиеся материалы с малой исходной пластичностью показывают также незначительные увеличения истинных напряжений (рис. 2,б).

Сталь X18H9T относится к числу стабилизирующихся материалов. Подсчет истинных напряжений при разрушении в квазистатической области показывает, что циклическое нагружение сопровождается интенсивным уменьшением истинной деформации за цикл при поддержании постоянства амплитудных значений нагрузки. Так, для образца, долговечность которого равнялась 217 циклам, максимальная истинная деформация за цикл уменьшилась в 5,8 раза при $k = 18$ и в 14,7 раза при $k = 278$ (примерно половина долговечности). Истинное напряжение при этом увеличилось

соответственно на 14,5 и 29% (или на 37,5 и 54,5% по отношению к условному напряжению). Если судить по истинным деформациям, то сталь X18H9T обладает признаками упрочняющегося материала: при мягком нагружении наблюдается с ростом числа циклов нагружения уменьшение истинных деформаций и увеличение истинных напряжений за цикл.

При жестком нагружении сталь X18H9T также интенсивно упрочняется. Во втором цикле (при $k = 2$) наблюдалось увеличение напряжения по сравнению с первым ($k = 0$) на 52% (долговечность образца $N_p = 36$ циклов). Для 25-го цикла ($k = 48$) это увеличение уже составляет по сравнению с нулевым полупериодом 134%.

Для сталей 22к и 45, являющихся циклически стабильными, интенсивность увеличения истинных деформаций и напряжений в области квазистатического типа разрушения не столь велика, как у стали X18H9T. Это определяется прежде всего исходной пластичностью материала. Причем не только величиной относительного сужения ψ , значения которого отличаются для данных сталей сравнительно мало, но и склонностью к упрочнению, характеризуемой разницей между пределом прочности σ_b и пределом текучести $\sigma_{0,2}$. Для стали X18H9T эта разность, отнесенная к σ_b , равна 0,6, в то время как для стали 22к и стали 45 соответственно 0,46 и 0,55. Для алюминиевого сплава АД-33 указанная разница составляет

всего лишь 0,25. Вместе с тем АД-33 является материалом упрочняющимся, хотя интенсивность упрочнения по числу циклов, как было показано выше, невелика.

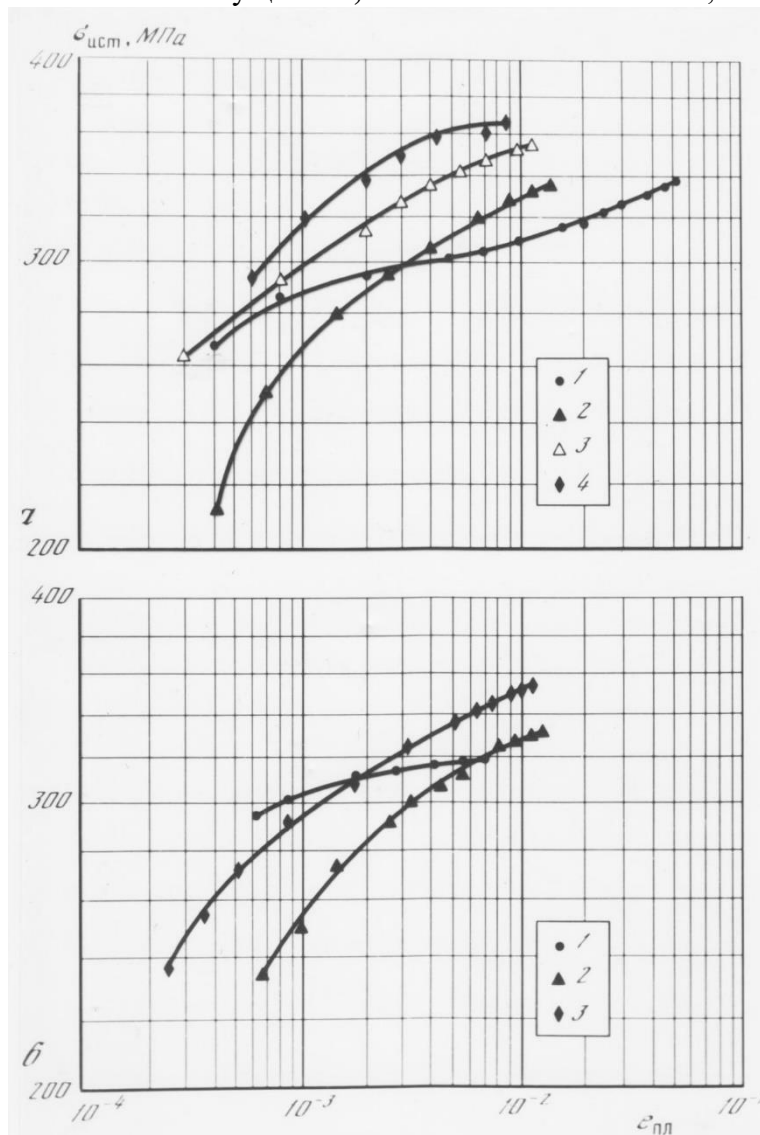


Рис. 2. Характер изменения истинных напряжений и деформаций в полуциклах растяжения упрочняющегося алюминиевого сплава АД-33: а- мягкое нагружение: 1 - $\kappa=0$, 2 - $\kappa=2$, 3 - $\kappa=3$, 4 - $\kappa=44$; б - жесткое нагружение; 1 - $\kappa=0$, 2 - $\kappa=2$, 3 - $\kappa=58$.

Если интенсивность упрочнения определяется величиной $(\sigma_b - \sigma_{0,2})/\sigma_b$ (или $\sigma_{0,2}/\sigma_b$), то длительность упрочнения (по отношению к общей долговечности образца) определяется величиной ϵ_b/ϵ (где ϵ_b – равномерная деформация, соответствующая σ_b ; ϵ – предельная деформация, определяющая несущую способность образца при однократном разрыве).

Изменение истинных напряжений и деформаций в интервале квазистатического разрушения зависит, помимо указанных свойств самого материала, также от величины действующей нагрузки, которая определяет остаточную накопленную деформацию (остаточное сужение) при мягком нагружении. С уменьшением величины нагрузки остаточное сужение при разрушении снижается и истинные напряжения и деформации до момента образования трещины приближаются к условным. В области квазистатического разрушения разница между истинными и условными напряжениями при разрушении выше у материалов,

обладающих большей пластичностью. Для стали ТС условные и истинные разрушающие напряжения могут отличаться более чем в 3 раза (рис. 3). Связано это, с одной стороны, с упрочнением материала при пластическом деформировании, с другой – с образованием шейки. Причем, как показывает эксперимент (рис. 3), при циклическом упругопластическом деформировании разупрочняющейся стали ТС в интервале квазистатического разрушения ($N_p < 1000$ циклов) наблюдается даже увеличение пластичности (при статическом разрушении $\psi = 73,5$, при $N_p = 730$ циклов $\psi = 78,5\%$).

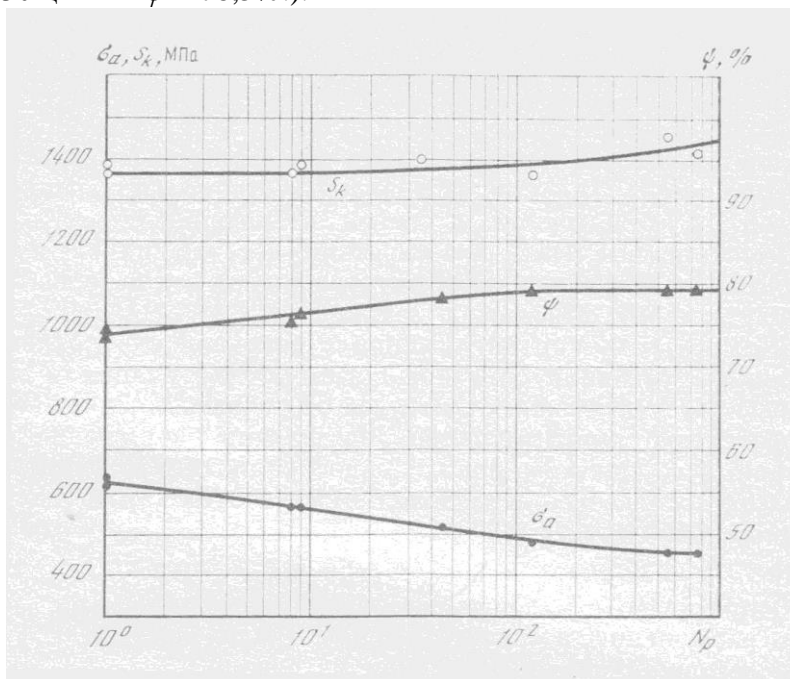


Рис. 3. Сопротивление усталости по истинным (при окончательном разрушении) и условным напряжениям и изменение поперечного сужения при малоцикловом разрушении стали ТС.

Следовательно, при квазистатическом разрушении кинетика истинных напряжений и деформаций определяется типом материала и условиями нагружения. Для разупрочняющегося материала характерно постепенное увеличение истинных деформаций с ростом числа циклов мягкого нагружения и ростом истинных напряжений в первых нескольких циклах жесткого нагружения с последующим их незначительным монотонным снижением до момента образования трещины.

Упрочняющиеся и стабилизирующиеся материалы характеризуются интенсивным упрочнением, особенно в первые циклы нагружения. В дальнейшем упрочняющийся материал имеет затухающий характер изменения истинных деформаций вплоть до разрушения. Причем упрочняющиеся материалы, в особенности обладающие малой пластичностью, разрушаются с образованием трещины перед разрушением (усталостный тип разрушения). Материалы стабильные, обладающие большой пластичностью (большим отношением $(\sigma_b - \sigma_{0,2})/\sigma_b$), после интенсивного упрочнения в первых циклах стремятся к стабильному состоянию. В условиях квазистатического разрушения такие материалы не успевают стабилизироваться по истинным деформациям, хотя по условным напряжениям стабильный участок составляет значительную долю долговечности. По истинным напряжениям такого рода материалы правильнее отнести к упрочняющимся, чем к стабилизирующимся. При жестком нагружении материалы с малым значением $(\sigma_b - \sigma_{0,2})/\sigma_b$ показывают большое увеличение напряжений, они могут превышать более чем в 2 раза напряжения нулевого полуцикла. Упрочняющиеся материалы с большим отношением $(\sigma_b - \sigma_{0,2})/\sigma_b$ и при жестком нагружении проявляют

более интенсивное увеличение напряжений в первых циклах нагружения с дальнейшим их затуханием в последующих циклах. Причем до момента образования трещины максимальное напряжение в цикле остается выше исходного (в нулевом полуцикле).

Следует отметить также, что для разрушения различных материалов в квазистатической области требуются различные исходные деформации. Для упрочняющихся и стабилизирующихся материалов, в особенности с малым отношением $(\sigma_b - \sigma_{0,2})/\sigma_b$, требуются значительные пластические деформации в нулевом полуцикле, в то время как для разупрочняющихся материалов эти деформации имеют небольшую величину.

Таким образом, при нагружении в условиях однородного напряженного состояния образцов истинные деформации и напряжения могут существенно отличаться от условных, и это обстоятельство следует учитывать при определении напряженно-деформированных состояний в зонах концентрации напряжений, основанных на использовании данных о циклических характеристиках сплошных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.42-62.
10. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 10. Сопротивление малоциклового деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала, № 1, 2016, с.
11. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 11. Структурные параметры деформационного старения при высокотемпературном малоцикловом разрушении. Вестник научно-технического развития, №3, 2016. с.27-37.
12. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М., Наука. 1988, 280 с.

Дата поступления: 29 июня 2016 года.