

Софья Павловна Дегтярева^{1*}, Сергей Александрович Пескишев², Елена Александровна Тихомирова²

¹ОАО «НПО ЦКТИ» им. И.И. Ползунова, г. Санкт – Петербург, Россия;

²Санкт – Петербургский Государственный Морской Технический Университет (СПбГМТУ), г. Санкт – Петербург, Россия.

*Bulgakova.sf@gmail.com

РАЗВИТИЕ РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛА

Проведен анализ существующих представлений о соответствии кривых деформации в термоциклических и при механическом нагружении. Предложен новый подход к изучению данной проблемы путем определения долговечности и достигаемой деформации разрушения при многократном повторении полуцикла охлаждения и сопоставления их с паспортными данными механических испытаниях стали 12X18H10T. Показано, что процесс разрушения материала при термическом воздействии в полуцикле охлаждения идентичен происходящему в механических испытаниях на растяжение. Сопоставлены значения деформации разрушения при многократном повторении полуцикла охлаждения (растяжение) и полуцикла нагрева (сжатие) при том же количестве циклов, как фактора, определяющего длительность термоусталостных испытаний.

Ключевые слова: Разрушение, термическая усталость, испытания, кривые деформации, деформация, материаловедение.

Sofia P. Degtiareva, Sergey A. Peskichev, Elena A. Tikhomirova

THE DEVELOPMENT OF DESTRUCTION UNDER CONDITIONS OF THERMAL LOADING OF METAL

The analysis of studies comparing deformation curves in thermal semi-cycles and under mechanical loading is carried out. Tests with a new approach have been proposed and carried out aimed at establishing compliance with durability with repeated repetition of the cooling half cycle and the nominal value of the fracture deformation obtained during mechanical tensile tests for steel 12X18H10T. It is shown that the process of material destruction under thermal action in a semi-cooling cycle is identical to what occurs in mechanical tensile tests. The values of fracture deformation obtained in the half-cycle of cooling (stretching) and in the half-cycle of heating (compression) are compared. A possible explanation for the duration of thermal fatigue tests is proposed.

Keywords: Destruction, thermal fatigue, testing, deformation curves, deformation, materials science

Закономерности пластической деформации в условиях циклических теплосмен, приводящие изделия к разрушению, термической усталостью, представляют значительный практический интерес. Особенно в связи с тем, что термические условия работы изделий в современных условиях эксплуатации становятся все более жесткими. Поэтому существенное сокращение в настоящее время количества исследований термической усталости, о чем свидетельствует сокращение объема публикаций, будет иметь нежелательные последствия. При этом негативная сторона исследований термической усталости в прошлые годы, как и современных, усматривается в том, что, как отмечал В.Г. Барило [1] «закономерности повреждения материала элементов конструкций, в частности термонапряженных деталей двигателей, существенно отличаются от закономерностей повреждения материала исследуемых образцов». По закону Л.Ф. Коффина [2] число теплосмен до разрушения – долговечность (N_p) зависит от величины пластической деформации в цикле ($\epsilon_{пл}$). Однако, как указывал С.С. Мэнсон [3] установить корреляцию поведения образца и готового изделия при циклических теплосменах не представляется возможным в связи с не идентичностью развития пластической деформации в них. Тем не менее, именно пластическая деформация в реальных условиях, оказывая воздействие на материал изделий и с течением времени ведет их к разрушению. Пластическая деформация сопровождается зарождением, движением, размножением и взаимодействием дислокаций между собой и с прочими дефектами, и все это в ходе изменения температуры и постоянного чередования сжатия и растяжения.

На начальном этапе изучения термической усталости были проведены исследования характеристик диаграммы деформации в полуциклах ТЦ испытаний, их зависимости от условий испытаний и степени соответствия диаграммам при механическом нагружении в изотермических условиях [4, 5]. Было показано [4], что в ходе изменения температуры в каждом из полуциклов она плавно нарастает (рис.1а), а регистрируемая кривая деформации $\sigma=f(\epsilon)$ (рис.1б) подобна, наблюдаемой при механическом нагружении.

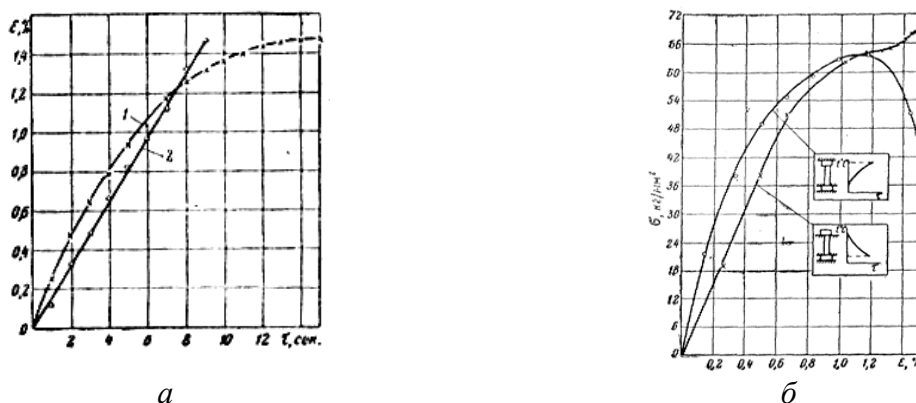


Рис.1 Кривые изменения упругопластической деформации в полуциклах(а) и диаграммы деформирования сплава ЭИ437 в полуциклах (б) изменения температуры при охлаждении (1) и нагреве (2).

Представляется, что помимо сопоставления кривых деформации при механическом и термическом нагружении, целесообразно исследуя термическую усталость в материале воспользоваться таким параметром, как количество циклов до разрушения (N_p) при многократном осуществлении полуцикла охлаждения и его зависимостью от пластической деформации в каждом из них, сопоставив со значениями, полученными при механических испытаниях ($N_p = \delta_B / \Delta \epsilon_{пл}$). Полезную информацию могут дать также сведения о пластической деформации, достигаемой за N_p циклов, при нагреве ($T_{min} \leftrightarrow T_{max}$) и разность этих величин в полуциклах охлаждения и нагрева при анализе долговечности.

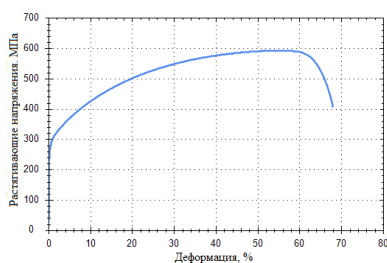
В целях получения данных для сравнения процессов, происходящих в металле при механическом воздействии и при термическом нагружении, были проведены испытания, в которых выполняли многократное повторение полуцикла охлаждения или нагрева, создавая стеснение свободной термической деформации, которое обеспечивало растяжение или сжатие в материале.

Испытания выполняли на установке ИМАШ-65-6, снабженной дополнительно съемным блоком нагружения (Рис.2) для выполнения рентгеноструктурных и металлографических исследований образцов, в том числе нагруженных.

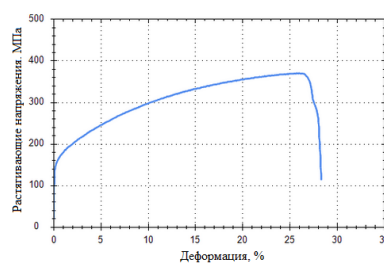


Рис.2. Съемный блок нагружения.

Исследования проводились на стали 12Х18Н10Т, кривые деформации которой приведены на рис.3. При комнатной температуре ее предел текучести $\sigma_{0,2} = 225\text{--}315\text{ МПа}$, предел прочности $\sigma_B = 550\text{--}650\text{ МПа}$ и удлинение при разрыве $\delta_B = 46\text{--}74\%$, к тому же наблюдается существенное деформационное упрочнение при растяжении.



а



б

Рис.3 Кривые деформации стали 12Х18Н10Т при 20(а) и 300°C(б).

Используемые плоские образцы имели различную форму и размеры заплечиков для варьирования величины пластической деформации в полуцикле испытаний, сохраняя термический режим $500 \rightarrow 20^\circ\text{C}$ или $20 \rightarrow 500^\circ\text{C}$ в [6].

Подобранная группа образцов (рис.4), проходила предварительную подготовку, включая разметку, которая служила для контроля распределения температуры в образце и измерения удлинений в ходе нагружения. Нагрев образца осуществлялся пропусканием электрического тока. Жесткое стеснение в полуциклах нагружения создавали, фиксируя головки образцов болтами к охлаждаемым опорам блока нагружения.

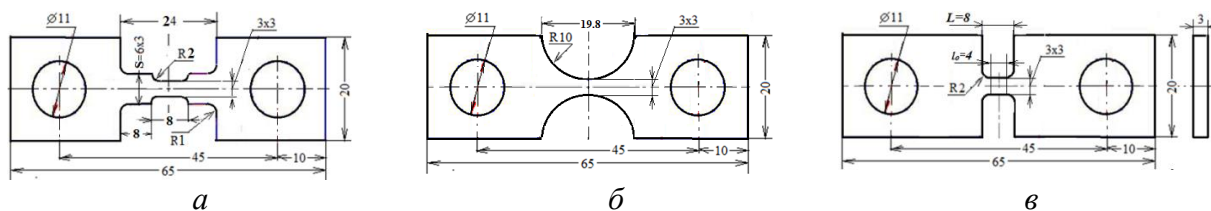


Рис.4. Образцы с заплечиками различной формы и размеров.

Каждое испытание включало два этапа изменения температуры - нагрев и охлаждение, в одном из которых производили термическое нагружение испытываемого образца. Полуциклу охлаждения с растяжением образца, предшествовал нагрев в свободном состоянии до 500°C , а за полуциклом сжатия при нагреве стесненного образца следовало свободное охлаждение.

При многократном повторении полуцикла охлаждения на образцах, имеющих разный геометрический профиль, прослеживалась зависимость долговечности от величины пластической деформации в полуцикле. Проведенные испытания позволяли установить количество циклов до разрушения (N_p), пластическую деформацию при разрушении ($\delta_{\text{охл}}$) и ее величину ($\varepsilon_{\text{пл}}^3 = \delta_{\text{охл}}/N_p$) в полуцикле охлаждения для трех типов образцов, с различной расчетной деформацией ($\varepsilon_{\text{пл}}^p$).

В таблице 1 представлены результаты (средние значения), полученные при периодическом нагружении исследуемых образцов в полуциклах охлаждения.

Таблица 1.

Результаты испытания в полуциклах охлаждения.

Тип образца	N_p	$\varepsilon_{\text{пл}}^3$ %	$\varepsilon_{\text{пл}}^p$ %	Δl , мм	$\delta_{\text{охл}}$, %
Образец ДСП	42	2,5	3,4	4,2	105
Корсетный образец	53	1,8	2,6	3,8	95
Образец Коффина	66	1,3	1,7	3,4	86

При испытании образцов типа ДСП (рис.4а) разрушение наблюдалось после 42 полуциклов охлаждения и общее удлинение составило около 4,2 мм, что соответствует деформации при разрушении $\delta_{\text{охл}} \sim 105\%$, а в полуцикле $\varepsilon_{\text{пл}}^3 \sim 2,5\%$. В испытаниях на корсетных образцах (рис.4б), которые выполняли тем же способом нагружения, долговечность N_p составляла 53 полуцикла, общее удлинение – 3,8мм и деформация разрушения - 95%. Примерно такова же величина $\delta_{\text{охл}} = 86\%$ в образце Коффина (рис.4в), значение $N_p = 66$, удлинение 3,4мм и $\varepsilon_{\text{пл}}^3 = 1,3\%$.

Значения $\delta_{\text{охл}}$, полученные в эксперименте, заметно превышают паспортную характеристику стали 12X18H10T $\delta_{\text{в}}=47-74\%$, которая присуща механическому нагружению. Полагаем, что наблюдаемое отличие, обусловлено тем, что нагружению в каждом полуцикле охлаждения предшествует нагрев образца в свободном состоянии и это снижает уровень упрочнения, рост напряжений от цикла к циклу и, в конечном итоге, сказывается на развитии магистральной трещины.

Для проверки наличия упрочнения материала, которое присуще стали 12X18H10T (рис.3), были проведены измерения микротвердости на длине рабочей части образца ДСП (рис.4а). Твердость на головке образца 178 НВ, а в центре, где происходила пластическая деформация 275 НВ. Влияние упрочнения прослеживалось и при рентгеновских исследованиях в изменении полуширины линии (311) дифракционного спектра деформированных образцов.

Полезную информацию дают сведения о пластической деформации ($\delta_{\text{нагр}}$), достигаемой при нагреве за те же N_p циклов испытаний, что при охлаждении, и по тому же термическому режиму ($T_{\text{min}} \leftrightarrow T_{\text{max}}$) (см. таблице 2.)

Таблица 2.

Результаты испытаний с нагружением в полуцикле нагрева.

Тип образца	N_p	$\epsilon_{\text{пл}}^{\text{э}}$ %	$\epsilon_{\text{пл}}^{\text{р}}$ %	$\delta_{\text{нагр}}$ %
Образец ДСП	42	2,1	3,4	89
Корсетный образец	53	1,5	2,6	80
Образец Коффина	66	1,1	1,7	73

Разность полученных величин деформации за одинаковое количество циклов при нагреве и охлаждении, вероятно, имеет отношение к пониманию развития разрушения при термоциклических нагрузках и возможно объясняет продолжительность термоусталостных испытаний, где количество циклов до разрушения исчисляется обычно на уровне до $\sim 10^4$ циклов.

Заключение.

1. Явление термической усталости важно учитывать при оценке эксплуатационных характеристик материалов изделий, т.к. было показано, на основании сопоставления кривых деформации, что в ней и при механическом нагружении разрушение развивается идентично.

2. Проведенные испытания путем многократного повторения полуцикла охлаждения стали 12X18H10T показали, что деформация разрушения в них ($\delta_{\text{охл}}$) близка по величине к наблюдаемой при механическом нагружении ($\delta_{\text{в}}$) .

3. Измерения микро-твердости и уширения дифракционных линий в центре образцов – области пластической деформации в полуциклах показали, что она сопровождается упрочнением материала, присущего стали 12X18H10T.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барило В. Г. Использование кольцевых образцов клиновидного сечения для исследования термической усталости материалов. / В. Г. Барило, // Проблемы прочности. 1989. № 2. С. 60-64.
2. Coffin L. F., Schenectady N. Y. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on Ductile Metal. / L. F. Coffin, N. Y. Schenectady. // Transaction ASME. 1954. V. 76. № 6. P. 931-950.
3. Мэнсон С. С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. / С. С. Мэнсон. М.: Машиностроение, 1974. 344 с.
4. Серенсен С. В., Котов П. И. Об испытании при циклическом тепловом нагружении варьируемой жесткости в связи с исследованием термической усталости. / С. В. Серенсен, П. И. Котов. // Заводская лаборатория. 1959. № 10. С. 1216-1223.
5. Котов П. И., Гусенков А. П., Вашунин А. И. Метод оценки сопротивления термической усталости жаропрочных сплавов. / П. И. Котов, А. П. Гусенков, А. И. Вашунин. // Заводская лаборатория. 1978. Т. 43. № 7. С. 862 – 867.
6. Дегтярева С. П. Термоциклические испытания с применением образцов корсетной формы – перспективный метод исследования термической усталости изделий. / С. П. Дегтярева // Вопросы материаловедения. 2020. № 3 (103). С. 61-70.

REFERENCES

1. Barilo V.G. Ispolzovanie koltsevykh odraztsov klinovidnogo secteniya dlya issledovaniya termicheskoy ustalosti materialov. [The use of annular wedge-shaped samples for the study of thermal fatigue of materials./ V.G. Barilo. // Problemy prochnosti. 1989. № 2. S. 60-64 [in Russian].
2. Coffin L. F., Schenectady N. Y. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on Ductile Metal. / L. F. Coffin, N. Y. Schenectady. // Transaction ASME. 1954. V. 76. № 6. P. 931-950.
3. Manson S. S. Thermal stresses and low cycle fatigue. / S. S. Manson // M.: Mashinostroenie. 1974. 344 s [in Russian].
4. Serensen S. V., Kotov P. I. Ob ispytanii pri tsiklicheskom teplovom nagruzhenii var'iruemoi zhestkosti v svyazi s issledovaniem termicheskoi ustalosti [About the thermal cyclic tests under variation of force rigidity at thermal fatigue investigations] / S. V. Serensen, P. I. Kotov // Zavod. Lab. 1959. Vol. 25. N 10. P. 1217-1223 [in Russian].
5. Kotov P. I., Gusenkov A. P., Vashunin A. I. Metod otsenki soprotivleniy termicheskoi ustalosti zharoprochnykh splavov. [A method for evaluating the thermal fatigue resistance of heat-resistant alloys.] / P. I. Kotov, A. P. Gusenkov, A. I. Vashunin // Zavod. Lab. 1978. № 7. С. 862 – 867 [in Russian].
6. Degtyareva S. P. Termotsiklicheskie ispytaniy s primeneniem obrastsov korsetnoy formy – perspektivnyy metod issledovaniy termitseskoy ustalosti. [Thermocyclic tests using corset shape samples are a promising method for

studying the thermal fatigue of products.] / S. P. Degtyareva. // Voprosy materialovedeniy. 2020. № 3 (103). S. 61-70 [in Russian] .