

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ КОМБИНИРОВАННОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Ю.Н. Ребяков, О.Ф. Чернявский

Деформационные и прочностные свойства материалов в условиях малоциклового знакопеременного течения (при ненулевых размахах пластических деформаций за цикл) и при прогрессирующем формоизменении (ненулевых приращениях деформаций за цикл) исследованы подробно и тщательно [1, 2]. Часто встречающиеся комбинированные процессы, в которых накопленные за цикл циклические и статические повреждения соизмеримы, изучены пока недостаточно. Отсутствуют как стандарты на проведение испытаний, так и справочные данные, необходимые для про-

гнозирования поведения конструкций. Исключение составляют лишь мягкие циклы, являющиеся частным случаем переменного соотношения между размахами и приращениями деформаций [1]. Одной из причин является, по-видимому, тот факт, что при одинаковых циклических и статических повреждениях различия между приращением деформации за цикл, шириной петли пластического гистерезиса и накопленной полной деформацией могут достигать нескольких тысяч раз, что осложняет измерение деформаций.

В данной работе приводятся методики и результаты экспериментального исследования процессов комбинированного малоциклового деформирования применяемых в энергомашиностроении сталей X18H9T, 03X21H32M3B (ЭП 864) и сплава ХН55МВЦ в диапазоне температур 20–600 °С. Для этих сталей в жестких циклах характерно типичное поведение: циклическое упрочнение на стадии приработки сменяется стабилизацией с последующим разупрочнением на стадии предразрушения. Испытания проводились на установке с цифровым программным управлением при растяжении-сжатии корсетных образцов с фиксацией поперечной деформации [3]. Методики проведения испытаний и обработки результатов учитывали требования ГОСТ 25.505-85 [4].

Деформирование образцов производилось по двум различным программам. В первой из них вначале производилось жесткое циклическое деформирование с постоянным заданным размахом пластической деформации за цикл $\Delta\varepsilon_p'$. Затем следовал статический долом, т. е. монотонное увеличение деформации вплоть до разрушения. Испытания проводились при различных размахах деформации и различных циклических повреждениях (отношениях числа циклов N с заданным размахом деформации к числу циклов до образования макротрещины N_f при том же размахе). Полученная диаграмма деформирования сопоставлялась с диаграммой однократного (без циклических нагружений) деформирования.

Типичные результаты таких испытаний иллюстрируют рис. 1 и 2. Отметим здесь три характерных особенности диаграмм долома.

Положение и форма диаграммы долома зависят от циклического упрочнения (разупрочнения), накопленного на предыдущем этапе.

При достаточно заметной ширине петли пластического гистерезиса переход от этой петли к диаграмме статического деформирования (долома) происходил плавно, без сколько-нибудь заметных изломов. В точке реверса при выходе из петли гистерезиса касательная к диаграмме долома являлась касательной к продолжению петли, т. е. к обобщенной диаграмме циклического жесткого деформирования [1] (единой кривой). Этот факт важен при анализе устойчивости процесса неупругого циклического деформирования. По-видимому, он объясняется «памятью» материала. Носителями этой «памяти» являются остаточные микронапряжения и изменения структуры, которые в момент выхода из петли гистерезиса соответст-

вуют предшествующему процессу циклического деформирования. Можно отметить, что при упругой разгрузке и повторном нагружении (т. е. при исчезающе малой ширине петли гистерезиса) остаточные микронапряжения и изменения структуры также весьма малы, но, как известно, даже их влияние обычно отчетливо обнаруживается при испытаниях.

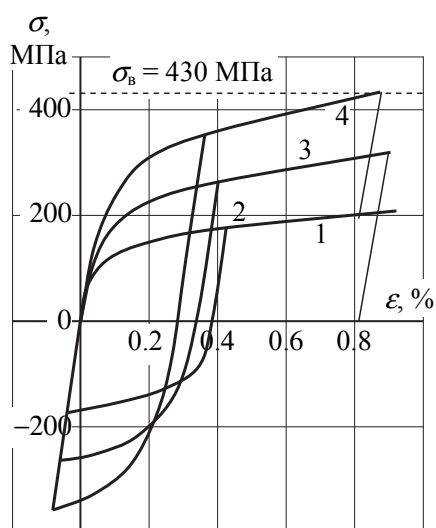


Рис. 1. Кривые деформирования стали ЭП864 при 600 °С: 1 – кривая статического нагружения; 2, 3, 4 – «долом» после циклического упрочнения на базе 1, 25 и 450 циклов

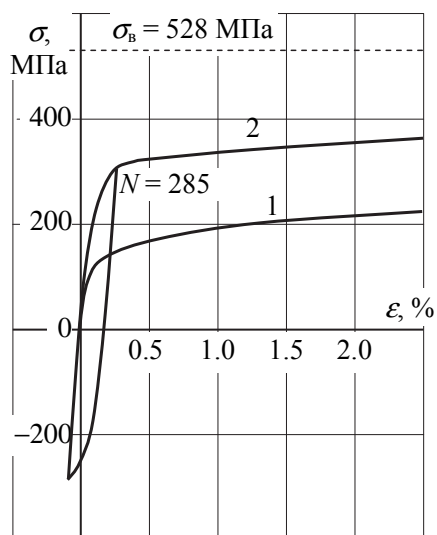


Рис. 2. Кривые деформирования сплава ХН55МВЦ при 400 °С: 1 – статическая кривая; 2 – кривая деформирования (долом) после 285 циклов при $\Delta\varepsilon_p' = 0,375\%$

Следующей важной особенностью диаграммы долома для всех испытанных материалов является весьма медленное «забывание» циклического упрочнения (или разупрочнения) при увеличении накопленной деформации (статического повреждения). В соответствии с полученным на этапе циклического деформирования циклическим упрочнением диаграмма долома проходит выше (при разупрочнении – ниже) кривой однократного монотонного деформирования. С увеличением накопленной деформации расстояние между этими кривыми постепенно уменьшается, но к моменту разрушения образца может оставаться значительной частью той величины, которая имела место в момент выхода из петли гистерезиса даже в случае, когда циклическое повреждение является небольшим. Отметим, что положение кривой долома, определяемое величиной циклического упрочнения или разупрочнения, зависит от размаха пластической деформации и числа циклов. В качестве параметра при описании этой зависимости может быть или накопленные циклические и статические повреждения [1]. Связь этих величин очевидна, но накопленные повреждения могут быть более информативны, поскольку зависят не только от пути деформирования, но и от предельных (разрушающих) деформаций.

В испытаниях по второй программе проводилось блочное нагружение образца: выполнялось N жестких циклов с заданным постоянным размахом пластической деформации за цикл $\Delta\varepsilon_p'$, после этого давалось приращение деформации $\delta\varepsilon_p'$, величина которого обеспечивала равенство расчетных статического и циклического повреждений. Такие блоки из двух этапов с равными повреждениями повторялись вплоть до разрушения образца. Статическое повреждение в блоке определялось как отношение приращения деформации за цикл $\delta\varepsilon_p'$ к разрушающей деформации при статическом нагружении ε_f' . Циклическое повреждение определялось как отношение числа циклов в блоке к разрушающему при том же размахе деформации за цикл. Величины ε_f' и N_f вычислялись с использованием справочных данных [2], полученных ранее при испытаниях на той же установке. Приблизительность и ограниченность такого подхода очевидны; в общем случае испытания необходимо проводить как минимум при различных отношениях циклических и статических повреждений. В данном случае целью было лишь обеспечение соизмеримости повреждений. С другой стороны, этот подход позволил избежать трудностей, связанных с необходимостью измерения одним деформометром величин приращений, размахов и полных деформаций, различающихся на 3–4 порядка. Испытания проводились при различных значениях $\Delta\varepsilon_p'$ и N . Типичный результат иллюстрирует рис. 3. Изображенные здесь петли гистерезиса соответствуют последнему циклу каждого блока, за которым следовало приращение деформации. Последующее циклическое деформирование (50 жестких циклов в каждом блоке) сопровождалось циклическим разупрочнением, которое постепенно усиливалось с увеличением числа блоков. В девятом блоке появилась макротрещина.

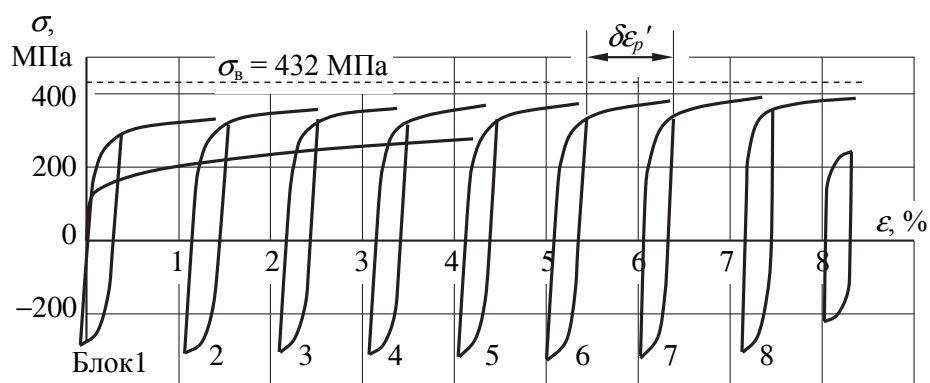


Рис. 3. Блочное нагружение сплава ЭП864 при 600 °С:
 $\delta\varepsilon_p' = 1,06$ %, $\Delta\varepsilon_p' = 0,27$ %; кривая 0 – статическое нагружение

Рис. 3 показывает, что характерные особенности диаграмм деформирования, обнаруженные при долоте после жестких циклов, полностью сохраняются при блочном нагружении. Очевидно, что они сохраняются и в том случае, когда блок будет содержать один цикл с последующим приращением деформации.

Приведенные результаты показывают, что при расчетах процессов комбинированного малоциклового деформирования конструкций учет зависимости деформационных свойств материала от взаимного влияния циклических и статических повреждений обязателен при наличии циклического

упрочнения или разупрочнения (полное отсутствие этих эффектов является, по-видимому, редким исключением).

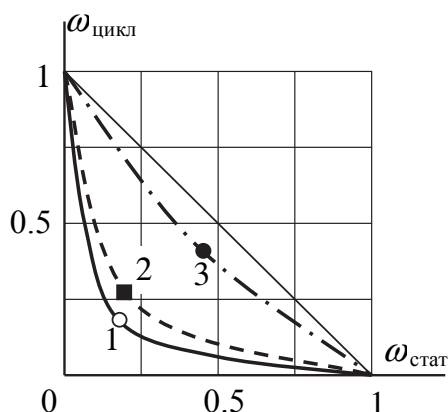


Рис. 4. Кривые повреждаемости сталей ЭП864, ЭИ612: 1 – ЭП864 (400 °C), 2 – ЭП864 (600 °C), 3 – ЭИ612 (650 °C)

По результатам описанных выше испытаний до появления макротрещины оценивалась возможность использования закона линейного суммирования повреждений. Результаты приведены на рис. 4. При линейном суммировании предельная линия, отвечающая появлению трещины, строится по двум точкам. Очевидно, что задача построения такой линии аналогична задаче построения диаграммы предельных амплитуд в случае многоциклового усталости. Как в том, так и в другом случае построение предельной линии по трем точкам дает более точный результат.

Библиографический список

1. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – Новосибирск: Наука, 2005. – 493 с.; 610 с.
2. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справ. / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
3. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии / Ю.Н. Ребяков, А.О. Чернявский, О.Ф. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10 (186). – С. 4–16.
4. ГОСТ 25.505-85. Методы механических испытаний металлов. Методы механических испытаний при термомеханическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.