

## Обмен опытом

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ  
КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Статья поступила 13 мая 2015 г.

Для исследования микроструктурных процессов развития повреждений в материалах при термической усталости предложена конструкция блока нагружения установки [1], позволяющая выполнять термоциклические испытания на плоских образцах корсетной формы. Такой образец дает возможность подготовить металлографический шлиф в его рабочей зоне. При этом исключен хорошо зарекомендовавший себя механизм крепления головок образца с помощью резьбовых соединений [2]. В данном случае [1] «жесткость нагружения образца зависит от ряда моментов: силы, с которой образец затягивается на устройстве, степени износа зубцов устройства, внедряющихся в головки образца, температурного режима термоциклирования и материала образца». Все эти факторы имеют особенно большое значение при испытании образцов из материалов с высокой твердостью. С учетом возможных проблем с нагружением в таких испытаниях рекомендовано контролировать нежесткость стеснения [1] путем наблюдения за смещением пары рисок, расположенных близи центра образца на расстоянии  $\pm 2$  мм. Эта рекомендация основана на том представлении, что деформация в расчетной зоне  $l_0$  развивается вследствие только ее жесткого стеснения правой и левой частями образца. За упругопластическую деформацию  $\Delta \epsilon$  принимается величина, равная стесненной свободной термической деформации  $l_0$ , при этом  $\Delta \epsilon = \epsilon_0 = \alpha_{\text{ср}}(T)\Delta T$  [3]. На самом деле [4, 5] деформация в центре корсетного образца развивается иначе — благодаря воздействию извне, а именно со стороны односторонне стесненных заплечиков, в которых плавно возрастают упругая деформация и напряжения по мере изменения температуры. В конечном итоге пластическая деформация  $\epsilon_{\text{пл}} = \Delta l_{\text{пл}}/l_0$  локализуется в зоне  $l_0$ , где наименьшее сечение и наибольшая температура.

Она компенсирует ту часть ( $\Delta l_{\text{пл}}$ ) стесненного термического удлинения образца  $\Delta l_{\text{терм}}$ , которую не может компенсировать его упругое удлинение  $\Delta l_{\text{упр}}$ , т.е. разность  $\Delta l_{\text{пл}} = \Delta l_{\text{терм}} - \Delta l_{\text{упр}}$ . Экспериментальная проверка [6] с использованием штатного блока нагружения установки ИМАШ-5с-65 показала правильность предложенного объяснения динамики развития деформации, а также методики расчета пластической деформации  $\epsilon_{\text{пл}}$  в цикле испытаний корсетного образца, но обнаружил заниженные значения измеренных величин  $\Delta l_{\text{пл}}$  и, соответственно,  $\epsilon_{\text{пл}}$ . Это можно объяс-

нить лишь проскальзыванием головок образца относительно крепления [1]. В результате проскальзывания уменьшается доля  $\Delta l_{\text{терм}}$ , которую должна компенсировать  $\Delta l_{\text{пл}}$ . При этом риски, нанесенные вблизи центра образца для контроля нежесткости стеснения [1], не могут «чувствовать» проскальзывания головок и использоваться для корректировки.

Преимущество термоциклических испытаний, выполняемых на корсетных образцах, по нашему мнению [5], состоит в том, что они позволяют исследовать сопротивление термической усталости не только материалов, но и реальных изделий, позволяя моделировать развивающееся в них локальное разрушение в результате действия циклических нагревов. Предлагаем изменить применяемый метод расчета  $\epsilon_{\text{пл}}$  и экспериментально определять пластическую деформацию в цикле испытаний  $\epsilon_{\text{пл}}$ , чтобы получать представление о долговечности. Необходимо устранить возможность проскальзывания головок, которое является причиной потери информации о действительной величине  $\epsilon_{\text{пл}}$  и недостоверности результатов испытаний. Установка ИМАШ-5с-65, которая позволяет также выполнять металлографические исследования, хорошо подходит для работ, связанных с моделированием проблем термической усталости изделий. Поэтому целесообразно изменить конструкцию блока нагружения установки в части, касающейся крепления головок образца.

Предлагаемая конструкция блока нагружения представлена на рис. 1, а образец для испытаний и распределение температуры в нем при различных величинах максимальной температуры ( $T_{\text{max}}$ ) в его центре — на рис. 2. Блок нагружения образца 1, как и в штатном устройстве [1], включает две плашки — 12, 13, стянутые болтами и изолированные электрически друг от друга слюдяной прокладкой 14 и от основания (не показано) фторопластовой пластиной 15. В плашку 13 запрессована стальная втулка с резьбовым отверстием по оси, в которое ввернута шпилька 4. В верхней части шпильки 4 выполнен поясок шириной, равной толщине, и диаметром, соответствующим диаметру отверстия в образце 1. На резьбовой конец шпильки 4 наворачивается гайка 11, прижимающая головку образца к зубцам, выполненным на верхнем торце втулки. К боковой стенке другой плашки 12 привернута вилка 6, в прорези которой установлен стержень 5 с наружной резьбой и двумя гайками 8, 9, которые упираются в стенки вилки 6 с двух сторон и

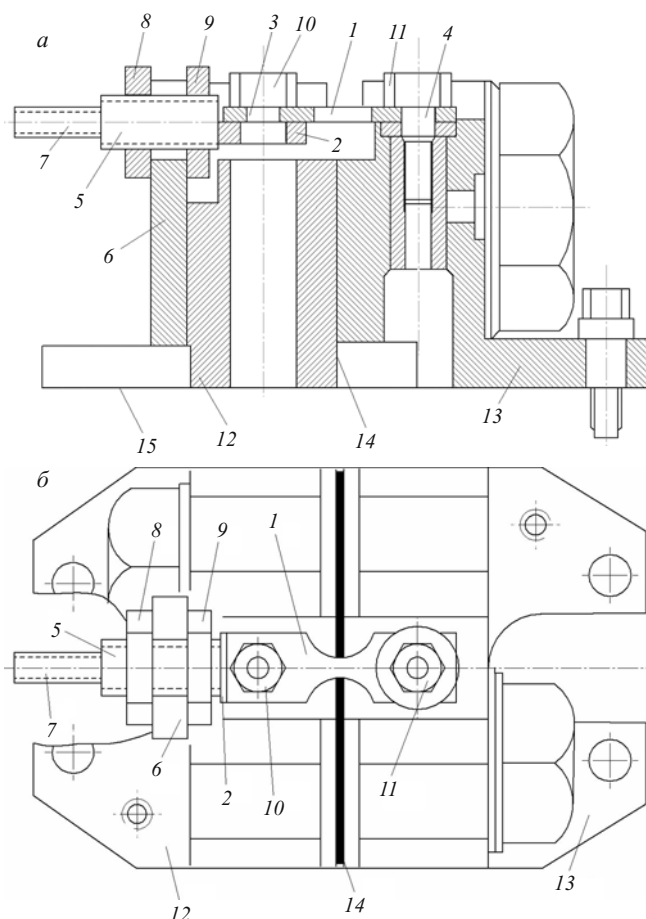


Рис. 1. Блок нагружения для термоциклических испытаний плоских корсетных образцов

ограничивают перемещение стержня 5 в осевом направлении. На торце стержня 5 выполнена планка 2, несущая запрессованную в ней ось 3, снабженную пояском, как на шпильке 4, и резьбой под гайку 10, обеспечивающую крепление второй головки образца 1. Хвостовик 7 на другой стороне стержня 5 служит для закрепления вспомогательной электрошины, чтобы поддерживать ток, проходящий через образец 1, при освобождении гаек 8, 9.

При подготовке к испытаниям на планке 2 снято стержня 5 устанавливают одну из головок образца 1, надев ее на поясик оси 3 и закрепив гайкой 10. Стержень 5 располагают в прорези вилки 6, при этом вторую головку образца 1 надевают на поясик шпильки 4, где закрепляют гайкой 11. Закручивая гайку 8 натягивают цепочку стержень-образец, затем затягивают гайки 10, 11, 9, обеспечивая жесткую фиксацию образца в системе нагружения при выполнении цикличе-

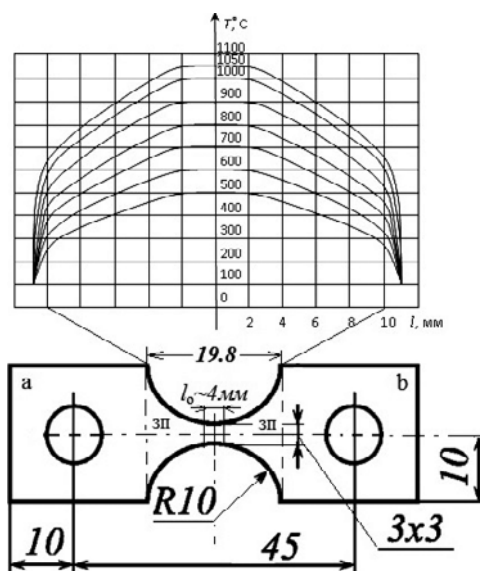


Рис. 2. Плоский корсетный образец и распределение в нем температуры

ских нагревов. Слабым местом системы является сопряжение поясков на оси 3 и шпильке 4 с отверстиями в головках образца 1. Отверстия в головках должны быть выполнены по достаточно высокому классу точности. Тем не менее зазор между поясками и отверстиями в головках при необходимости следует заполнить слоем стальной фольги. Возможное проскальзывание головок относительно оси 3 и шпильки 4 не может быть произвольным, поскольку оно ограничено величиной допуска отверстий, по крайней мере, при термоциклических испытаниях жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) эта величина вполне допустима и может составлять всего несколько десятых процента от свободного термического удлинения  $\Delta l_{\text{терм}}$  (см. таблицу) для применяемого типа образца при характерных термических режимах испытаний ЖНС.

Преимущество предлагаемой конструкции, помимо отмеченного ограничения возможного проскальзывания, состоит еще и в том, что примененная схема жесткой фиксации образца позволяет проводить испытания, предусматривающие нагружение и разгрузку образца при произвольно выбранных температурах, а не только в конечных точках термического интервала испытаний. Это, в частности, дает возможность измерять пластическую деформацию в цикле испытаний корсетного образца и величину накопленной деформации после определенного числа циклов.

Таким образом, представлена конструкция блока нагружения установки для испытания плоских корсет-

Свободное термическое удлинение (сжатие) образцов ЖНС

|                                            | $T_{\text{max}}, ^\circ\text{C} (T_{\text{min}} = 20)$ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|                                            | 200                                                    | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 850 | 900 | 1000 | 1050 | 1100 |
| $\Delta l_{\text{терм}}$ (расчетное), мкм  | 29                                                     | 60  | 84  | 112 | 141 | 170 | 204 | 225 | 246 | 281  | 304  | 327  |
| $\Delta l_{\text{терм}}$ (измеренное), мкм | —                                                      | —   | 75  | —   | 150 | —   | 200 | —   | —   | 275  | —    | 320  |

ных образцов, позволяющая ограничить неконтролируемое проскальзывание головок образца, что является причиной недостоверности испытаний, а также расширить программу возможных испытаний и проводить металлографические исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гугелев Б. М., Гецов Л. Б., Журавлев Ю. А., Новикова Е. Г. Метод микроструктурного исследования повреждений в металлах при термической усталости / Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 1. С. 94 – 97.
2. Серенсен С. В., Котов П. И. Об испытании при циклическом тепловом нагружении варьируемой жесткости в связи с исследованием термической усталости / Заводская лаборатория. 1959. Т. 25. № 10. С. 1217 – 1223.
3. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Семенов А. С. и др. Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении / Надежность и безопасность энергетики. 2012. № 18. С. 53 – 62.
4. Тихомирова Е. А., Сидохин Ф. А., Азизов Т. Н. и др. О термоциклических испытаниях на корсетных образцах / Материаловедение. 2014. № 4. С. 10 – 13.
5. Тихомирова Е. А., Сидохин Е. Ф. Особенности термической усталости монокристаллических образцов корсетной формы при циклических нагревах / Материаловедение. 2015. № 4. С. 33 – 39.
6. Тихомирова Е. А., Сидохин Е. Ф. О пластической деформации корсетных образцов при термоциклических испытаниях / Материаловедение. 2015. № 9. С. 3 – 6.

## REFERENCES

1. Gugelev B. M., Getsov L. B., Zhuravlev Yu. A., Novikova E. G. Metod mikrostrukturnogo issledovaniya povrezhdenii v metallakh pri termicheskoj ustalosti [The microstructural investigation method of damages in the metals at the thermal fatigue] / Zavod. Lab. 1976. Vol. 42. N 1. P. 94 – 97 [in Russian].
2. Serensen S. V., Kotov P. I. Ob ispytanii pri tsiklicheskom teplovom nagruzhении var'iruemoi zhestkosti v svyazi s issledovaniem termicheskoj ustalosti [About the thermal cyclic tests under variation of force rigidity at thermal fatigue investigations] / Zavod. Lab. 1959. Vol. 25. N 10. P. 1217 – 1223 [in Russian].
3. Getsov L. B., Rybnikov A. I., Semenov A. S. i dr. Soprotivlenie deformirovaniyu i razrusheniyu monokristallicheskih spлавov pri staticheskom i termotsiklicheskom nagruzhении [The deformation and fracture resistance of single crystal alloys at static and thermal cyclic forcing] / Nadezhn. Bezopasn. Energet. 2012. N 18. P. 53 – 62 [in Russian].
4. Tikhomirova E. A., Sidokhin F. A., Azizov T. N. i dr. O termotsiklicheskih ispytaniyakh na korsetnykh obratzsakh [About the thermal-cyclic tests by mean of the variation of force rigidity method] / Materialovedenie. 2014. N 4. P. 10 – 13 [in Russian].
5. Tikhomirova E. A., Sidokhin E. F. Osobennosti termicheskoj ustalosti monokristal'nykh obratzsov korsetnoi formy pri tsiklicheskih nagrevakh [The thermal fatigue peculiarities of corset single crystal specimens at the cyclic heatings] / Materialovedenie. 2015. N 4. P. 33 – 39 [in Russian].
6. Tikhomirova E. A., Sidokhin E. F. O plasticheskoi deformatsii korsetnykh obratzsov pri termotsiklicheskih ispytaniyakh [About plastic deformation of the corset specimens at thermal-cyclic tests] / Materialovedenie. 2015. N 9. P. 3 – 6 [in Russian].

© Е. А. Тихомирова<sup>1</sup>, Е. Ф. Сидохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Климов», С.-Петербург, Россия;  
e-mail: tixomirova00@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «КБ Рентгеновские приборы»,  
С.-Петербург, Россия;  
e-mail: esidohin@yandex.ru