

УДК 620.172.2:620.175.2

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА И КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

© А. В. Зинин¹, Н. Г. Бычков², А. В. Першин², В. В. Авруцкий², Л. Л. Смирнова¹

Статья поступила 23 июня 2016 г.

Приведена методика экспериментальной оценки долговечности жаропрочного сплава ЖС6У при совместном действии термомеханических и вибрационных нагрузок в условиях неизотермического нагружения на основе моделей Коффина. Для реализации комбинированного нагружения разработана и реализована испытательная установка, позволяющая ультразвуковым методом отслеживать кинетику процесса циклического упругопластического деформирования. Показано, что наложение дополнительных высокочастотных нагрузок приводит к существенному снижению термоциклической долговечности сплава ЖС6У.

Ключевые слова: термоциклическая прочность; двухчастотное неизотермическое нагружение; вибрационные нагрузки; накопление повреждений; методы испытаний; ультразвуковой контроль.

Для многих современных силовых установок характерны тепловые потоки большой мощности, высокие уровни механических нагрузок, циклический характер режимов эксплуатации. Особенностью работы конструктивных элементов газотурбинных двигателей (ГТД) является нестационарность теплового и силового нагружений, определяющая циклический характер процесса упругопластического деформирования материала, протекающего, как правило, в неизотермических условиях. Кроме того, все детали ГТД подвержены воздействию вибрационных нагрузок. Обычно на доведенном двигателе уровень вибрационных нагрузок невелик, однако при взаимодействии с малоцикловыми и статическими нагрузками возможны катастрофические последствия [1, 2].

Переход на эксплуатацию двигателей по «состоянию» предполагает более точную оценку накопленного в материале повреждения и остаточной работоспособности детали и узла в целом. Известные в настоящее время методы контроля выработки ресурса базируются, как правило, на косвенной оценке накопленного в материале повреждения [3 – 5]. Вместе с тем большой практический интерес представляет использование методов неразрушающего контроля для непосредственной оценки остаточной работоспособности материала деталей [2, 6].

Детали турбин ГТД в эксплуатации нагружены центробежными, вибрационными и термомеханическими нагрузками. Вопрос оценки долговечности материалов, работающих в условиях совместного действия термоциклических длительных статических и

вибрационных нагрузок, связан с экспериментальным исследованием моделей долговечности материала при комбинированном нагружении.

Основная часть характеристик термической усталости материалов (приблизительно 70 % данных) получена в мировой практике «коффиновским» методом [2, 7], который хорошо имитирует процесс образования термоциклических напряжений в деталях при эксплуатации двигателей. Многолетняя практика получения характеристик термической усталости материалов модернизированным методом Коффина является приоритетной при исследованиях закономерностей малоциклового усталости для бигармонического нагружения образцов в неизотермических условиях.

Из всего многообразия испытательных машин для прочностных исследований в условиях бигармонического нагружения [6] наиболее полно реализуют метод Коффина установки, разработанные и реализованные в ЦИАМ. На рис. 1 представлена конструктивная схема установки П-926.

Установка П-926 имеет массивное основание 1, на котором расположена силовая рама, состоящая из колонн 2, связанных между собой при помощи верхней траверсы 3. На основании 1 размещено активное нагружающее устройство 6 для нагружения осевой нагрузкой, в полости которого размещен трубопровод 7, предназначенный для подачи охлаждающей среды. На траверсе 3 закреплена втулка 4, в которой установлен пассивный захват 5, имеющий возможность осевого перемещения для регулирования положения образца 19 в процессе подготовки испытаний. На подвижной траверсе 8 размещена платформа 9, которая связана с траверсой при помощи средства регистрации термических нагрузок, выполненного в виде трех тензометрированных стержней 10. На платформе 9 закреплён

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия; e-mail: etv133@mail.ru

² ЦИАМ им. П. И. Баранова, Москва, Россия.

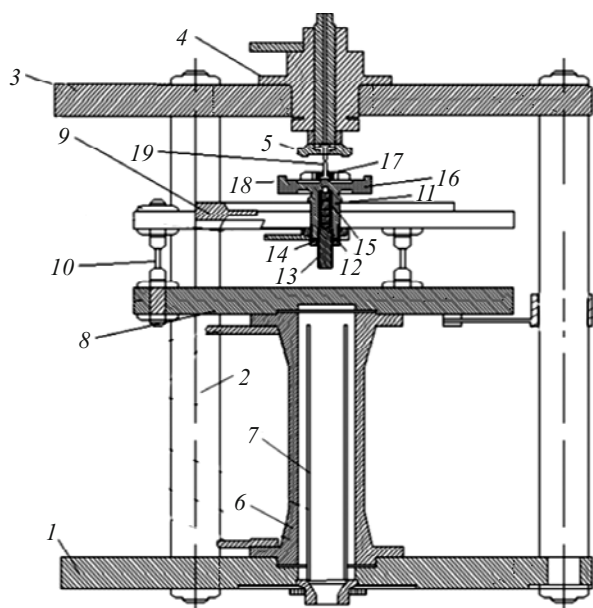


Рис. 1. Конструктивная схема установки П-926

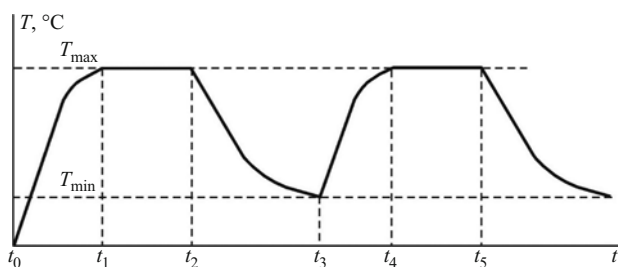


Рис. 2. Температурный цикл (нагрев – выдержка – охлаждение)

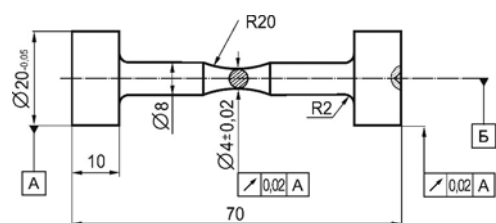


Рис. 3. Конструкция образца для испытаний на термоусталость с наложением вибрационных нагрузок

корпус 11 виброузла для нагружения образца высокочастотной знакопеременной нагрузкой. Виброузел содержит диск 16, центральная часть которого представляет собой активный захват 17, расположенный соосно пассивному захвату 5. Периферийная часть диска 16 содержит равномерно распределенную по его окружности инерционную массу 18, а средняя часть жестко связана с корпусом 11 устройства. На виброузле с помощью сферической шайбы 12, винта 13 и гайки 14 установлен также пакет пьезоэлементов 15. На активном захвате 17 закреплен датчик для контроля величины перемещений.

Образец нагревают электрическим током с использованием автоматизированной системы управле-

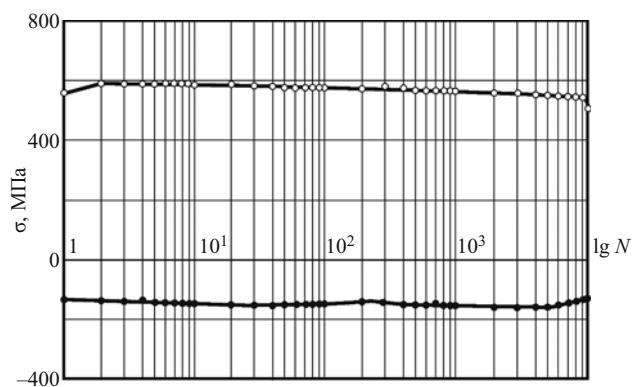


Рис. 4. Диаграмма изменения напряжений в образце во время термоциклирования

ния установки П-926, построенной на современной элементной базе, включающей ПИД-регуляторы и электронные реле времени, что позволяет проводить экспериментальные исследования в широком диапазоне изменения механических нагрузок и температур (от 100 до 1000 °С с выдержкой до 90 с) и обеспечивать необходимую выдержку и регистрацию параметров цикла. На рис. 2 схематично представлен температурный цикл, реализуемый на установке.

Выбор корсетной формы образцов для испытания с диаметром рабочего участка 4 мм (рис. 3) связан с необходимостью обеспечения требований устойчивости образцов, поскольку при реализации требуемых режимов нагружения термоциклические и вибрационные нагрузки направлены вдоль оси образца.

Отработку методики испытаний образцов при двухчастотном неизотермическом нагружении проводили на образцах из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС6У при термоциклировании в диапазоне $T_{\min} \leftrightarrow T_{\max} = 100 \leftrightarrow 1000$ °С при длительности термоцикла 1,3 мин, включая выдержку при $T_{\max} = 5$ с, что соответствует частоте изменения термоциклических напряжений 0,0125 Гц. Диаграмма изменения термических напряжений в образце во время термоциклических испытаний с размахом деформаций 0,5 % показана на рис. 4.

Для оценки влияния вибрационных нагрузок на характеристики термоциклической долговечности жаропрочных сплавов на первом этапе работы были получены базовые характеристики термической усталости (без вибрации) исследуемого сплава ЖС6У в рабочем диапазоне температур $100 \leftrightarrow 1000$ °С при размахе деформаций в цикле 0,5, 1 и 2 % и частоте нагружения 0,1 Гц. Кривая усталости сплава ЖС6У для таких условий нагружения представлена на рис. 5 (кривая 1).

На втором этапе испытания проводили термоциклическое нагружение с прежними параметрами при включённом возбудителе колебаний на резонансной частоте (515 Гц) диска вибрационного узла с образцом в захватах без дополнительных грузов (см. рис. 5,

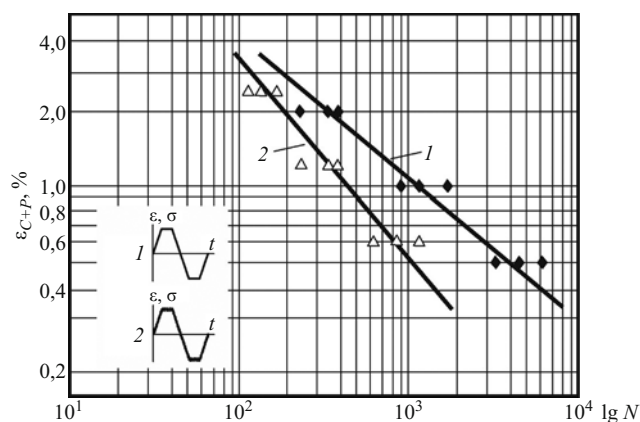


Рис. 5. Результаты испытаний на термоусталость образцов из сплава ЖС-6У по режиму $100 \leftrightarrow 1000$ °С: 1 — без вибрации, 2 — с наложением вибрации

кривая 2), что соответствует амплитуде вибрационных напряжений $\sigma_a = 30$ МПа. Диапазон отношений размахов вибрационных и термоциклических напряжений на различных режимах испытаний составлял 0,05 – 0,085.

Результаты испытаний показали, что наложение дополнительных высокочастотных нагрузок приводит к существенному снижению термоциклической долговечности сплава ЖС6У. Установлено усиление влияния вибрационных нагрузок на более низких уровнях размахов полной деформации, что свидетельствует о сложном процессе накопления кумулятивного усталостного повреждения. Можно предполагать, что характер накопления предельных малоцикловых повреждений и тип разрушения во многом определяются соотношением долей усталостного повреждения от термоциклирования и виброн нагружения, накапливаемых при реализации режимов нагружения с различными параметрами.

На рис. 6 представлены результаты ультразвуковой диагностики образцов сплава ЖС6У, полученные при различных уровнях термомеханической нагрузки. Первоначальный анализ кинетики процесса термоусталости с наложением вибраций ультразвуковым зеркально-теневым методом [6] показал, что скорость накопления суммарных повреждений от различных типов нагрузок значительно изменяется в зависимости от уровня действующей суммарной нагрузки. Поэтому основной задачей исследования кинетики процесса упругопластического деформирования в таких условиях следует считать количественную оценку степени влияния каждого фактора усталостного повреждения — термоциклирования и виброн нагружения.

Таким образом, экспериментально установлено, что для выполнения достоверных прочностных расчетов деталей ГТД и оценки их ресурса необходимо учитывать влияние вибрационной составляющей на свойства сплавов. В этом случае сложно оценить степень влияния каждого повреждающего фактора — термоциклирования и виброн нагружения. Дальнейшие

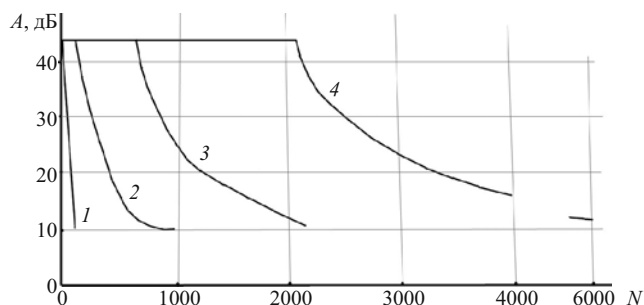


Рис. 6. Изменение амплитуды A донного сигнала от наработки N при различных уровнях нагрузки $\Delta\sigma$ (МПа), равных 359 (1), 333 (2), 216 (3) и 174 (4)

исследования с использованием ультразвуковых методов неразрушающего контроля и разработка деформационно-кинетической модели предельного состояния, интегрально учитывающий закономерности усталостных процессов, позволят создать методы прогнозирования термоциклической прочности жаропрочных сплавов при наложении вибрационных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А., Рачук В. С., Гаденин М. М., Рудис М. А., Паничкин Н. Г. Прочность и ресурс ЖРД. — М.: Наука, 2011. — 517 с.
2. Кузнецов Н. Д. Проблемы термоциклической прочности деталей ГТД / Проблемы прочности. 1978. № 6. С. 3 – 7.
3. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Под ред. Н. А. Махутова. — М.: Либроком, 2008. — 576 с.
4. Гаденин М. М. Особенности развития деформации и накопления повреждений при двухчастотном малоцикловом нагружении при повышенных температурах / Машиноведение. 1976. № 1. С. 69.
5. Степнов М. Н., Чернышев С. Л., Ковалев И. Е., Зинин А. В. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки. — М.: Технология машиностроения, 2010. — 256 с.
6. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1982. — 528 с.
7. Степнов М. Н., Агамиров Л. В., Зинин А. В., Котов П. И., Васильев Д. В., Кузьмин А. Е. Научные школы. Прочность машин и конструкций при переменных нагрузках. — М.: МАТИ, 2001. — 164 с.

REFERENCES

1. Makhutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M., Rudis M. A., Panichkin N. G. Prochnost' i resurs ZhRD [Strength and resource LJE]. — Moscow: Nauka, 2011. — 517 p. [in Russian].
2. Kuznetsov N. D. Problemy termotsiklicheskoj prochnosti detalei GTD [Problems of thermal cycling durability GTE parts] / Probl. Prochn. 1978. N 6. P. 3 – 7 [in Russian].
3. Makhutov N. A. (ed.). Prochnost', resurs, zhivuchest' i bezopasnost' mashin [Strength, resource, vitality and safety of machines]. — Moscow: Librokom, 2008. — 576 p. [in Russian].
4. Gadenin M. M. Osobennosti razvitiya deformatsii i nakopleniya povrezhdenii pri dvukhchastotnom malotsiklovom nagruzhении pri povyshennykh temperaturakh [Features of development deformation and damage accumulation at the two-frequency low-cycle loading at high temperatures] / Mashinovedenie. 1976. N 1. P. 69 [in Russian].
5. Stepnov M. N., Chernyshev S. L., Kovalev I. E., Zinin A. V. Kharakteristiki soprotivleniya ustalosti. Raschetnye metody otsenki [Characteristics of fatigue resistance. Calculation methods]. — Moscow: Tekhnologiya mashinostroeniya, 2010. — 256 p. [in Russian].
6. Klyuev V. V. (ed.). Ispytatel'naya tekhnika: Spravochnik [Test equipment: handbook]. In 2 books. — Moscow: Mashinostroenie, 1982. — 528 p. [in Russian].
7. Stepnov M. N., Agamirov L. V., Zinin A. V., Kotov P. I., Vasil'ev D. V., Kuz'min A. E. Nauchnye shkoly. Prochnost' mashin i konstruktsii pri peremennykh nagruzkakh [Scientific schools. The strength of machines and structures under variable loads]. — Moscow: Izd. MATI, 2001. — 164 p. [in Russian].