

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Циклическая прочность рабочих лопаток турбин из литых никелевых сплавов

В. Т. Трощенко^а, Б. А. Грязнов^а, И. С. Малашенко^б, Ю. С. Налимов^а,
А. А. Рабинович^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Украинско-американский исследовательский центр Pratt Swhithey–Paton, Киев, Украина

Исследованы циклическая прочность и долговечность рабочих лопаток из никелевых сплавов IN-738, ЗМИ-3У и ЭП539ЛМ газоперекачивающих агрегатов после значительной эксплуатационной наработки, на часть из которых наносилось защитное покрытие. Показано, что наибольшую циклическую прочность имеют лопатки из сплава IN-738. Циклическая прочность лопаток из сплава IN-738 без покрытия примерно на 10% выше, чем лопаток с покрытием.

Ключевые слова: циклическая прочность, кривая усталости, лопатка, защитное покрытие, газовые турбины, термостойкие сплавы.

Объект исследования. Развитие современного газотурбостроения обусловлено непрерывным повышением температуры, плотности и скорости газового потока. Существует также постоянная проблема загрязненности заборного воздуха. Указанные факторы приводят к снижению срока эксплуатации турбин. А это связано с проведением частых профилактических ремонтов, что весьма дорого. Поэтому необходимость увеличения рабочего ресурса и надежности эксплуатации газовых турбин является актуальной задачей. Прогресс в этом направлении обеспечивается благодаря созданию новых жаропрочных сплавов и эффективных технологий нанесения антикоррозионных покрытий для защиты деталей горячего тракта, в первую очередь рабочих и сопловых лопаток от агрессивного воздействия продуктов сгорания топлива.

Нанесение защитных покрытий на лопатки газовых турбин – общепризнанный подход к повышению их долговечности и надежности в эксплуатации. Традиционные термодиффузионные покрытия (алитирование, алюмосилицирование, хромосилицирование) оказались малоэффективными из-за повышения температуры газового потока, термических напряжений, удельных нагрузок и применения новых жаропрочных материалов. Ремонт лопаток турбин газоперекачивающих агрегатов (ГПА), в частности MS-3002 или

ГТК-10И, предполагает кроме механического удаления всех коррозионных дефектов восстановление покрытий профиля лопатки с использованием технологических приемов аргоно-дуговой сварки и высокотемпературной ремонтной пайки.

Лопатки турбин агрегатов ГТК-10И изготавливают обычно из сплавов IN-738, а в последнее время в Украине используются сплавы ЗМИ-3У или ЭП539ЛМ, которые имеют близкие физико-механические свойства. Известно, что на поверхность лопаток наносятся коррозионно-стойкие многокомпонентные покрытия CoCrAlY либо NiCoCrAlY путем осаждения паровой фазы в вакууме с использованием технологии электронно-лучевого испарения многокомпонентных сплавов [1, 2]. Преимущество этой технологии перед другими состоит в том, что одновременно из одного источника могут испаряться элементы с существенно разным давлением (упругостью паров) при температуре расплава 1500°C .

После нанесения покрытия лопатка подвергается финишной термообработке: старение при 845°C в течение 16–24 ч, если не наносится внешний упрочняющий керамический слой. В случае нанесения защитного покрытия из металлокерамики лопатки после осаждения упрочняющего керамического слоя толщиной до 90 мкм подвергают старению. На неохлаждаемых лопатках ГПА керамический слой выполняет в первую очередь функцию эрозионной и химической защиты внутреннего коррозионно-стойкого связующего покрытия MCrAlV , предотвращая его непосредственный контакт с продуктами сгорания топлива. Упрочняющее керамическое покрытие повышает долговечность рабочих лопаток турбовинтовых двигателей (ТВД) ГПА.

На примере сплава NASA-TRUVIA показано [3], что в результате осаждения в вакууме покрытия CoCrAlY толщиной 120–140 мкм какого-либо существенного изменения кратковременной либо длительной прочности и пластичности не происходит. Более подробно этот вопрос рассмотрен в монографиях [1, 4].

Вопрос влияния термодиффузионных покрытий типа Pt-Co-Al и Pt-Al на сопротивление никелевых сплавов IN-738, U-700, IN-939 циклическим нагрузкам рассмотрен в [5, 6].

Сравнение циклической прочности жаропрочных сплавов с диффузионными и конденсационными покрытиями в диапазоне $600\text{...}1037^\circ\text{C}$ показало, что у последних при высоких уровнях напряжений она выше.

Характер образцов никелевых жаропрочных сплавов с покрытиями при циклическом нагружении зависит от процессов зарождения и развития трещин в покрытии и основном металле, а также от воздействия коррозионной среды [7, 8].

Методика испытаний. Испытания проводили на электродинамическом стенде ВУС 20/5000 при изгибных колебаниях и комнатной температуре.

Поскольку испытуемые лопатки имеют высокую собственную частоту резонансных колебаний пера (порядка 2600 Гц), для получения необходимых уровней нагрузки, при которых возможно их разрушение, использовали специальное устройство (рис. 1), подробно описанное в [9]. Уровень сигнала возбуждения и его частоту задавали с помощью генератора типа ГЗ-34 путем подбора резонансной частоты колебаний лопатки.

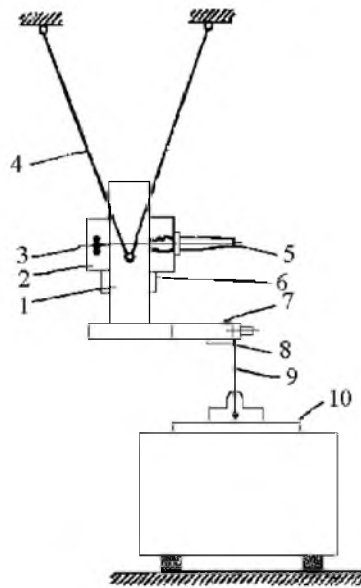


Рис. 1. Зажим для испытания на усталость лопаток с высокой частотой нагружения: 1 – рамка; 2 – сухарики; 3 – регулирующий палец; 4 – струны; 5 – лопатка; 6 – клин; 7 – консоль; 8 – тензорезистор; 9 – упругий элемент; 10 – стол вибростенда.

Число циклов нагружения регистрировали электронно-счетным частотомером ЧЗ-34. Для установления необходимого уровня напряжений в процессе испытаний предварительно проводили тензометрирование пера лопатки. Схема наклейки тензорезисторов типа КФ-5 (база 3 мм) приведена на рис. 2. Соответствие между измеряемым сигналом от тензорезистора и относительной деформацией пера лопатки устанавливали с помощью динамической тарировки балочки камертона (рис. 3).

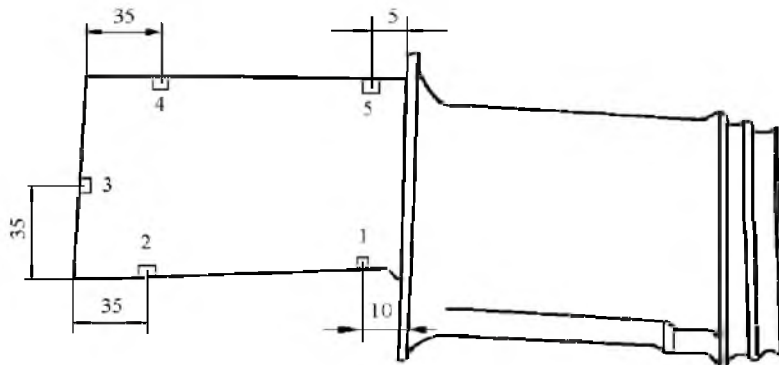


Рис. 2. Схема установки тензорезисторов (1-5 – место установки).

Предпочтительность использования камертона при динамической тарировке обусловлена тем, что при его колебаниях практически отсутствуют энергетические потери в “заделке”, и напряжения (деформации) можно с достаточной степенью точности рассчитать по известным зависимостям, приведенным ниже.

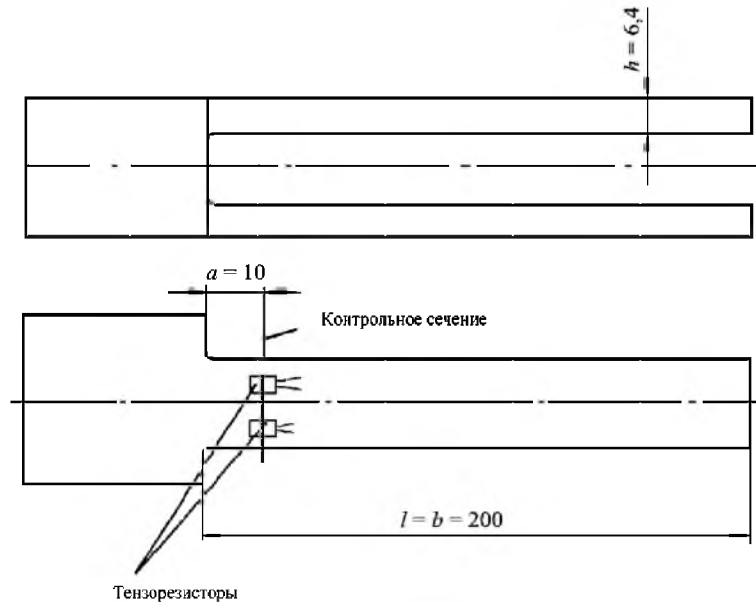


Рис. 3. Камертон с тензорезисторами для тарировки.

Данная методика разработана в Центральном институте авиационного моторостроения (Москва) и рекомендована для динамических тарировок на всех предприятиях авиационной промышленности.

Относительную деформацию в контрольном сечении балочки камертона определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{K_1^2 h S_m}{4l^2 S_y} 2A, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент для первой формы поперечных изгибных колебаний, равный 1,875; $2A$ – размах в точке контроля, мм; S_m и S_y – коэффициенты,

$$S_m = \operatorname{ch} K_1 X + \cos K_1 X + \frac{\operatorname{sh} K_1 - \sin K_1}{\operatorname{ch} K_1 + \cos K_1} (-\sin K_1 X - \operatorname{sh} K_1 X);$$

$$S_y = \operatorname{ch} K_1 X' - \cos K_1 X' + \frac{\operatorname{sh} K_1 - \sin K_1}{\operatorname{ch} K_1 + \cos K_1} (\sin K_1 X' - \operatorname{sh} K_1 X')$$

($X = a/l$; $X' = b/l$).

По результатам тарировки камертона определяли зависимость относительной деформации от сигнала тензорезистора:

$$\varepsilon = \xi_k V, \quad (2)$$

где V – сигнал от тензорезистора, контролируемый с помощью вольтметра тензоусилителя УТ-4, В; ξ_k – тарировочный коэффициент для камертона.

Затем проводили тензометрирование лопатки по тензорезисторам (рис. 2). При равных сигналах тензодатчиков на лопатке и камертоне полагали равенство их деформаций, что позволяет установить соответствие между напряжением в контролируемом сечении лопатки σ_a и размахом колебаний конца лопатки 2λ , мм:

$$2\lambda = \xi_{\text{л}} \sigma_a, \quad (3)$$

где $\xi_{\text{л}}$ – тарировочный коэффициент для лопатки (для места наклейки конкретного датчика),

$$\xi_{\text{л}} = \frac{2\lambda}{\xi_{\text{к}} V_{\text{л}} E}; \quad (4)$$

E – модуль упругости материала лопатки; $V_{\text{л}}$ – сигнал от тензорезистора.

В процессе усталостных испытаний определяли размах колебаний конца пера лопатки (торец выходной кромки), соответствующий заданному уровню амплитуд напряжений. Размах контролировали с помощью оптического микроскопа МБС-2, количество циклов и частоту – электронно-счетным частотомером ЧЗ-34. При этом величина приведенной основной погрешности установления заданной амплитуды напряжений составляла $\pm 2\%$.

За критерий предельного состояния (разрушения) лопатки принимали падение резонансной частоты колебаний менее чем на 1% (порядка 25...28 Гц), при этом в лопатке появлялась усталостная макротрещина длиной 2–3 мм.

Результаты тарировки лопатки. Использовали два варианта зажимов для испытания лопаток на усталость. Согласно первому варианту лопатки для испытаний и тарировки защемляли по ширине ножки лопатки. Необходимость рассмотрения двух вариантов зажимов обусловлена всесторонним изучением напряженного состояния и циклической прочности лопатки. Заметим, что при таких вариантах зажима лопатки разрушались одинаково, при этом напряжения в опасном сечении также были одинаковыми. Следует отметить, что второй вариант зажима лопатки оказался более удобным в эксперименте: зажим весит ~ 10 кг и в четыре раза легче. На рис. 4 показаны зажимы для испытания лопаток на усталость. В табл. 1 приведены результаты тензометрирования лопаток по двум вариантам их закрепления и рассчитанные уровни напряжений σ_a .

В процессе испытаний лопаток на усталость разрушение происходило в области малой полости на торце пера лопатки со стороны выходной кромки и развивалось по стенке лопатки со стороны спинки или корытца (рис. 5).

Исследуемая лопатка является достаточно жестким элементом для испытаний, и на частоте порядка 2600 Гц колеблется только угол выходной кромки конца пера лопатки. При этом на длине 23 мм (расстояние от угла до места разрушения, рис. 5) возможен большой градиент напряжений. Поэтому для уточнения уровня напряжения в месте разрушения использовали тензорезистор с базой 1 мм. Результаты тарировки показали, что при $2\lambda = 0,5$ мм уровень напряжения $\sigma_a = 50,8$ МПа.

Т а б л и ц а 1

Результаты тензометрирования лопатки

№ датчика на рис. 2	Первый вариант закрепления лопатки		Второй вариант закрепления лопатки	
	2λ , мм	σ_a , МПа	2λ , мм	σ_a , МПа
1	0,4	13,02	0,5	16,00
2	0,4	7,94	0,5	17,67
3	0,4	7,94	0,5	25,65
4	0,4	4,54	–	–
5	0,4	16,44	0,5	11,40

Примечание. $T = 293$ К, для первого варианта $f = 2500$ Гц, для второго $f = 2600$ Гц.



Рис. 4. Зажимы для испытания лопаток на усталость: *a* – первый вариант; *б* – второй вариант.

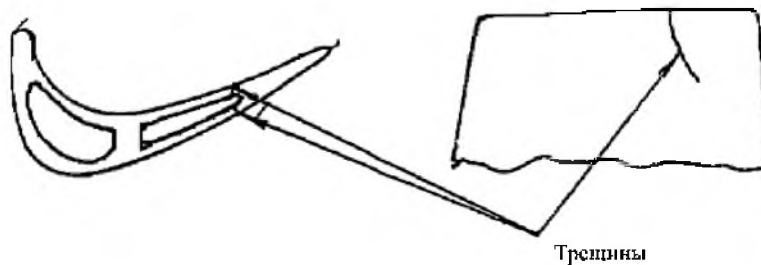


Рис. 5. Места появления трещин усталости.

Результаты испытаний лопаток на усталость. Лопатки без покрытия и с покрытием испытывали на усталость при схеме закрепления в зажиме по второму варианту. Результаты испытаний лопаток из сплава IN-738 приведены в табл. 2 и 3, а кривые усталости этих лопаток – на рис. 6. Лопатки разрушались у верхнего торца в области перемычки со стороны малой полости в равной степени как со стороны спинки, так и корытца (рис. 5). Исключением является разрушение лопатки № 1 с покрытием, происходящее со стороны корытца, но ближе к входной кромке, примерно посредине большой полости (табл. 3).

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний на усталость лопаток без покрытия

№ лопатки	2λ , мм	σ_a , МПа	f , Гц	$N \cdot 10^{-6}$, цикл
1	1,05	106,6	2850	1,71
2	0,90	91,4	2850	3,42
3	0,80	81,2	2930	6,15
4	0,70	71,1	2940	10,23

Примечание. $T = 293$ К, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний на усталость лопаток с покрытием

№ лопатки	2λ , мм	σ_a , МПа	f , Гц	$N \cdot 10^{-6}$, цикл
1	0,80	81,2	2940	1,94
2	0,75	76,1	2960	7,99
3	0,70	71,1	2900	3,48
4	0,70	71,1	2950	8,14
5	0,60	60,9	2700	20,00*

Примечание. $T = 293$ К, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, звездочкой обозначено лопатки, которые не разрушились.

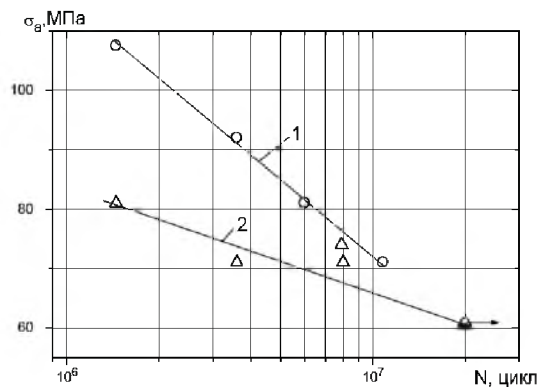


Рис. 6. Кривые усталости лопаток из сплава IN-738: 1, 2 – соответственно лопатки без покрытия и с покрытием.

Полученные результаты позволяют оценивать циклическую прочность исследуемых лопаток именно в верхней части с учетом влияния конструктивных (концентрация напряжений) и технологических факторов их изготовления.

Низкий уровень пределов выносливости исследуемых лопаток может свидетельствовать о некоторой некорректности результатов экспериментов. Поэтому для оценки свойств материала вырезали плоские образцы из ножки лопатки (рис. 7), которые затем тензометрировали и испытывали на усталость (рис. 8). Из рис. 8 видно, что предел выносливости образцов равен ~ 250 МПа и по величине соответствует характеристикам усталости рассматриваемых сплавов.

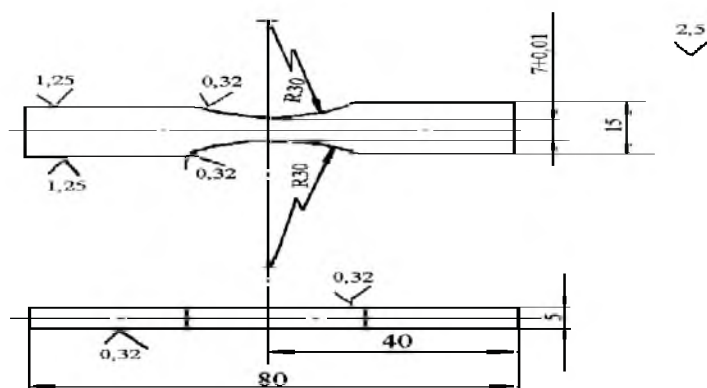


Рис. 7. Схема плоского образца для испытания на усталость.

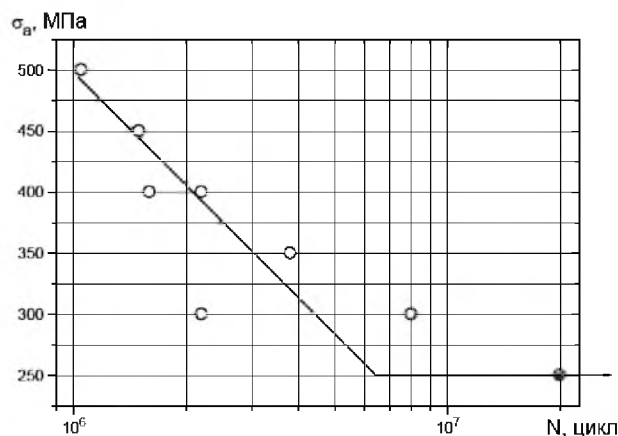


Рис. 8. Кривая усталости образцов, вырезанных из ножки лопатки из сплава IN-738.

Таким образом, низкий уровень предела выносливости лопаток можно объяснить наличием внутренней концентрации напряжений в конструкции лопаток и, возможно, технологических дефектов внутренней полости, которые значительно снижают циклическую прочность. То, что эти лопатки практически не разрушаются в эксплуатации и могут иметь большую наработку, свидетельствует о малых возмущающих силах на этих частотах в турбине (порядка 2500 Гц).

Кривые усталости (рис. 6) показывают, что циклическая прочность лопаток с покрытием несколько меньше (примерно на 10%), чем лопаток без покрытия. Однако с этим фактом приходится соглашаться, поскольку покрытие защищает поверхность материала лопаток от высокотемпературной коррозии.

Сравнительные испытания на усталость лопаток, изготовленных из сплавов IN-738, ЗМИ-3У и ЭП539ЛМ, приведены на рис. 9. Видно, что наибольшую циклическую прочность имеют лопатки из сплава IN-738.

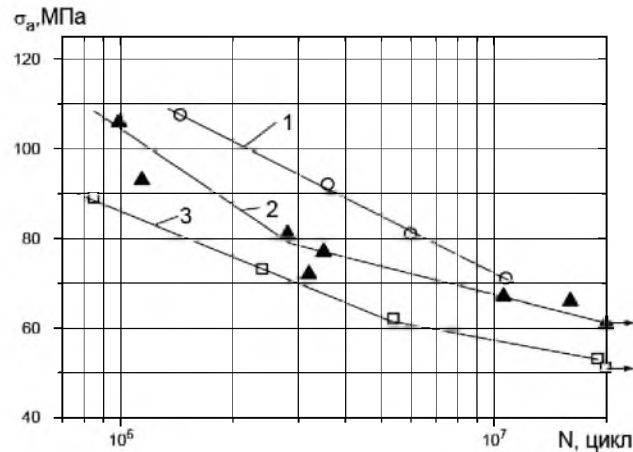


Рис. 9. Кривые усталости лопаток из никелевых сплавов IN-738 (1), ЗМИ-3У (2) и ЭП539ЛМ (3).

Заключение. Характеристики усталости рабочих лопаток ТВД, изготовленных из сплава IN-738, выше, чем лопаток из никелевых сплавов ЗМИ-3У и ЭП539ЛМ.

Многокомпонентное защитное покрытие, нанесенное на лопатки из сплава IN-738, приводит к снижению их циклической прочности примерно на 10%.

Резюме

Досліджено циклічну міцність і довговічність робочих лопаток із нікелевих сплавів IN-738, ЗМИ-3У і ЕП539ЛМ газоперекачувальних агрегатів після суттєвого експлуатаційного напрацювання, на частину яких наносили захисне покриття. Показано, що найбільшу циклічну міцність мають лопатки зі сплаву IN-738. Циклічна міцність лопаток зі сплаву IN-738 без покриття приблизно на 10% вища, ніж лопаток із покриттям.

1. Мовчан Б. А., Малашиенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 232 с.
2. Вуд Д. Х., Голдман Э. К. Защитные покрытия суперсплава. В 2 т. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных электроустановок. – М.: Металлургия, 1995. – Т. 2. – С. 88 – 121.

3. *Talboon F. P. and Elam R. C.* Evaluation of advanced superalloy protection system: Proc. 16th Nat. Symp. and Exhib. (Asness, USA). – 1971. – **16**. – P. 31 – 44.
4. *Гецов Л. Б.* Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
5. *Grilling H. W. and Keienburg K. H.* The interaction of high-temperature corrosion and mechanical properties of alloy // High-Temperature Alloys for Gas Turbines: Proc. Conf. (Liese, 4–6 Oct. 1982). – Dordrecht, 1982. – P. 507 – 543.
6. *Strong A. and Long E.* Effect of coatings on the mechanical properties of superalloys // High-Temperature Alloys for Gas Turbines: Proc. Conf. (Liese, 4–6 Oct. 1982). – Dordrecht, 1982. – P. 469 – 505.
7. *Мовчан Б. А., Малащенко И. С., Никитин В. И. и др.* Влияние покрытия CoCrAlY на физико-механические свойства сплава ЭИ893 рабочих лопаток турбины установки ГТ-100 // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1985. – № 1. – С. 34 – 43.
8. *Малащенко И. С., Осыка А. С., Рыбников А. И., Панков О. Г.* Результаты промышленной эксплуатации рабочих лопаток турбины энергетической установки ГТ-40 с конденсационными защитными покрытиями // Там же. – 1993. – № 1. – С. 53 – 65.
9. *Грязнов Б. А., Городецкий С. С., Налимов Ю. С. и др.* Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД. – Киев: Наук. думка, 1992. – 262 с.

Поступила 01. 03. 2006