

УДК 539.375

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Д. Г. ФЕДОРЧЕНКО<sup>1</sup>, Д. К. НОВИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>kipdla@ssau.ru

<sup>1</sup>ОАО «Кузнецов» (г. Самара)

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ)

*Поступила в редакцию 31 октября 2014 г.*

**Аннотация.** Рассматриваются методы повышения пределов выносливости деталей – разработка и введение специальных операций, упрочняющих их поверхность и снижающих влияние отрицательной технологической наследственности. Основное внимание уделено влиянию поверхностного пластического деформирования на повышение предела выносливости деталей.

**Ключевые слова:** технология; предел выносливости; усталость; упрочнение; поверхность; пластические деформации.

Основой прочностной надёжности принято считать высокие характеристики конструкционной прочности. Под конструкционной прочностью понимается прочность материалов в реальных условиях многокомпонентного нагружения с учетом конструктивных факторов и технологических особенностей изготовления. Можно считать, что конструкция, технология и материалы составляют единство, определяющее надёжность конструкции.

Технология изготовления оказывает существенное влияние на конструкционные характеристики деталей, при этом влияние технологии изготовления может быть не только положительным – направленным на повышение прочностных характеристик материалов, но и отрицательным, существенно снижающим характеристики сопротивления внешним нагрузкам. Поэтому вопросы технологических методов повышения надёжности и устранения отрицательного влияния технологической наследственности являются актуальными. Актуальность вопросов обеспечения технологической надёжности подтверждается и тем, что до 30 % всех дефектов двигателя на этапе доводки связано с вопросами изготовления [1, 2]. Около 65 % всех дефектов ГТД носит усталостный характер. Поэтому одним из основных вопросов повышения надёжности двигателей является снижение уровня действующих переменных нагрузок и повышение характеристик сопротивления усталости деталей [3, 4].

Повышение характеристик сопротивления усталости деталей возможно конструктивными

методами уменьшения концентрации напряжений, термообработкой, создающей оптимальную микроструктуру материала, покрытиями и специальными финишными технологическими операциями. Одним из основных методов повышения пределов выносливости деталей является разработка и введение специальных операций, упрочняющих их поверхность и снижающих влияние отрицательной технологической наследственности.

### ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ

Основными методами упрочняющих технологий являются:

- «механические», основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД) материала детали: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидродробеструйные, обкатка роликами, алмазное выглаживание, дорнирование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей;

- методы термопластического упрочнения (ТПУ), основанные на быстром охлаждении нагретой детали. Это приводит к высоким градиентам поля температур у поверхности, соответствующей эпюре температурных напряжений, что вызывает пластическое деформирование поверхностных слоев и, как следствие, приводит к образованию благоприятной эпюры сжимающих поверхностных остаточных напряжений после окончательного охлаждения детали;

- физические методы, основанные на обработке деталей потоком ускоренных ионов с их имплантацией в кристаллическую решетку поверхностных слоев материала, что приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях, поверхностному легированию и соответственно повышению предела выносливости.

### МЕТОД ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) получили наибольшее распространение и обеспечивают:

- 1) устранение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, наведенных при механической обработке, а также снижение отрицательного воздействия возможных субмикроскопических повреждений, вызванных растягивающими остаточными напряжениями, которые оказывают отрицательное влияние на характеристики сопротивления усталости на ранних стадиях работы до завершения процесса релаксации под действием рабочих температур, а также статических и динамических нагрузок;

- 2) положительное влияние сжимающих остаточных напряжений до их релаксации в процессе работы;

- 3) создание благоприятного микрорельефа поверхности при сохранении или уменьшении заданной шероховатости поверхности, при этом с увеличением радиуса впадин микрорельефа. Микрорельеф поверхности после поверхностного упрочнения устраняет потенциальные очаги зарождения трещин усталости в концентраторах напряжений в виде направленных рисок после механической обработки;

- 4) стабилизацию степени наклепа поверхности (плотности дислокаций) после механических обработок;

- 5) ликвидацию отрицательных проявлений статических надрывов и очагов, подготовленных для зарождения субмикроскопических трещин от механической обработки.

Для деталей с гальваническими, плазменными и другими покрытиями положительная роль поверхностного упрочнения определяется, прежде всего, действием сжимающих остаточных напряжений, наведенных в поверхности детали до или после образования покрытия. При наличии поверхностных сжимающих остаточных напряжений покрытия обладают большей работоспособностью.

Очевидна положительная роль поверхностного пластического деформирования для деталей со сварными швами, заключающаяся в ликвидации растягивающих остаточных напряжений, создании сжимающих остаточных напряжений, повышении статической прочности поверхностного слоя шва за счет наклепа.

Повышение твердости поверхности, благоприятный микрорельеф, сжимающие остаточные напряжения оказывают положительное влияние на предел выносливости и контактную выносливость деталей.

### ВЛИЯНИЕ ППД НА РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН И ВЫНОСЛИВОСТЬ

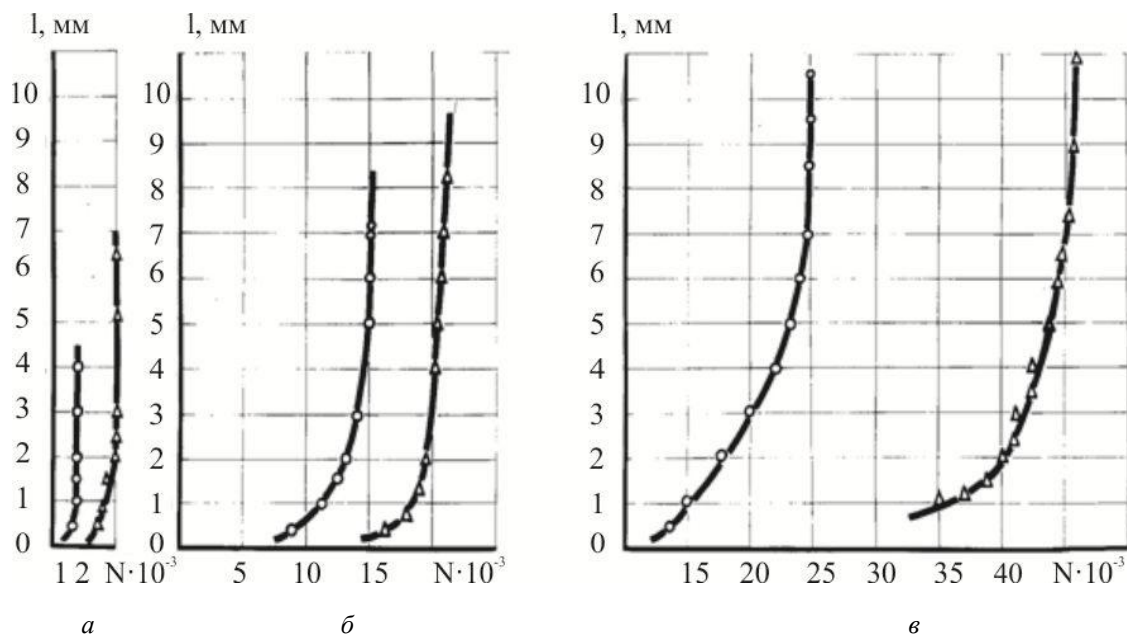
Восстанавливая потерянные при механической обработке физико-механические свойства поверхностного слоя, ППД обеспечивает задержку зарождения усталостной трещины и ее последующий замедленный рост при малоцикловом и высокочастотном нагружении. На рис. 1 показана кинетика развития трещин усталости при малоцикловом нагружении образцов из сплава ЭИ698ВД с максимальными напряжениями от нулевого цикла  $\sigma_0 = 900; 700; 600$  МПа. Испытания проводились при  $t = 20^\circ \text{C}$ . Из рис. 1 видно, что при всех уровнях нагружения наблюдается сдвиг начала зарождения трещин после упрочнения. Причем с уменьшением уровня нагружения долговечность до начала зарождения трещин возрастает. Аналогичные данные получены для сплавов ВТ-9, ЭП741ВД и других сплавов и сталей.

Опыт доводки газотурбинных двигателей показал, что применение поверхностного пластического деформирования оправдано для всех деталей, работающих в условиях высокочастотного циклического и малоциклового нагружения.

На современных газотурбинных двигателях более 60 % (более 200 наименований) деталей подвергаются упрочнению с целью стабилизации физико-механических свойств материала деталей и повышения их долговечности, в том числе:

- в компрессоре – 90 % (рабочие и направляющие лопатки, диски, валы, рабочие кольца, промежуточные и трактовые кольца, подшипники, роторные болты);
- в турбине – 50 % (рабочие лопатки, диски, валы, промежуточные кольца, дефлекторы);
- трубопроводы – 90 %;
- остальные детали – 15 %.

Зубчатые колеса редуктора также подвергаются поверхностному пластическому деформированию.



**Рис. 1.** Кинетика развития трещин усталости при малоцикловом нагружении образцов из сплава ЭИ698ВД с исходной после шлифования и упрочненной поверхностью:  
 ○ – без упрочнения, Δ – упрочненные микрошариками из материала ШХ715,  $\varnothing 150...200$  мкм,  $n = 3600$  об/мин,  $\tau = 3$  мин;  $\sigma_0 = 900$  МПа (а), 700 МПа (б) и 600 МПа (в)  
 (испытания поведены в лаборатории прочности ОАО «Кузнецов»)

В настоящее время нет однозначного объяснения эффекта влияния наклёпа и остаточных напряжений сжатия на повышение предела выносливости. Одним из объяснений, возможно, является то, что ППД обеспечивает интенсивный рост и значительную плотность линий скольжения, произвольно ориентированных в зёрнах обработанной поверхности, и выравнивает глубину распространения деформированных при обработке зёрен. Наличие пространственной разориентировки плоскостей скольжения в зёрнах и сжимающие остаточные напряжения, возникающие в процессе ППД, затормаживают развитие усталостных трещин.

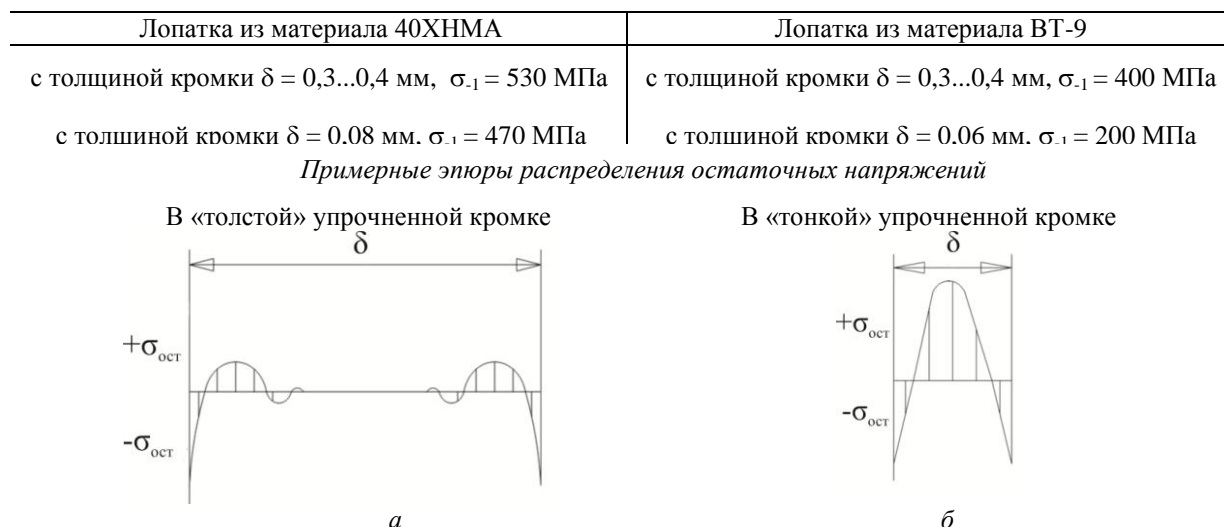
Развитие методов изучения дефектов в твёрдых телах и дислокационной структуры повреждений, очевидно, позволят найти физическое объяснение эффектов упрочнения поверхности и дать возможность прогнозирования усталостной прочности деталей по результатам исследований состояния поверхностных слоев материала.

Несмотря на отсутствие однозначного физического объяснения эффектов поверхностного упрочнения и чётких рекомендаций по выбору оптимальных эюр, величины остаточных напряжений и наклёпа, простота, универсальность и высокая эффективность разработанных методов упрочнения привели к их широкому распространению в авиационном двигателе- и самолётостроении.

Высокая эффективность и простота определили широкое внедрение упрочнения деталей методами ППД.

Основным направлением в развитии методов упрочнения ППД является создание надёжного, высокопроизводительного оборудования, оснащенного контрольно-измерительной аппаратурой, обеспечивающей регистрацию и регулирование параметров процесса упрочнения, поддерживающей перпендикулярное направление струи дробы по отношению к обрабатываемой поверхности.

Однако, несмотря на высокую эффективность и широкое внедрение упрочнения деталей методами ППД, необходимо корректно подходить к выбору способа упрочнения. Интенсивный наклёп поверхности, особенно тонкостенных деталей, может привести к их «перенаклёпу» и, как следствие, к резкому снижению предела выносливости. Отрицательное влияние перекалёпа тонких кромок лопаток компрессора из материалов 40ХНМА и ВТ-9 на их предел выносливости показано на рис. 2. Для снижения отрицательного влияния перекалёпа тонких кромок в процессе упрочнения их защищают от попадания дробы или используют более «мягкие» методы упрочнения (микрошарики, стекломикрошарики и др.).



**Рис. 2.** Выносливость лопаток компрессора с различными толщинами кромок: *a* – лопатка из материала 40ХНМА без упрочнения; *б* – лопатка из материала ВТ-9 упрочненная гидродробеструйной обработкой + виброгалтовкой

Таблица

№	Наименование детали	Материал	Метод упрочнения
1.	Рабочие лопатки КНД	ВТ-9	Гидродробеструйный наклеп $\varnothing 2,4$ мм + виброупрочнение
2.	Рабочие лопатки КСД	ВТ-9	Гидродробеструйный наклеп $\varnothing 2$ мм + виброупрочнение
3.	Рабочие лопатки КВД	ВТ-9, ЭП517, ЭП718	Пневмодинамическое упрочнение + виброшлифование
4.	Лопатка ВНА	ВТ-20	Гидродробеструйный наклеп + виброупрочнение
5.	Направляющие лопатки КНД	ВТ-20, ВТ-9	Гидродробеструйный наклеп + виброупрочнение
6.	Направляющие лопатки КСД	ВТ-9	Гидродробеструйный наклеп + виброупрочнение
7.	Направляющие лопатки КВД	ВТ-9, ЭП517, ЭП718	Пневмодинамическое упрочнение + виброшлифование
8.	Диски компрессора	ВТ-9	ПДУ + ГДУ + ПДК + раскатка + микрошарики
9.	Диски компрессора	ЭИ698	ПДУ+ВГ+ПДК+раскатка
10.	Кольцо промежуточное	ВТ-9	Обдувка микрошариками
11.	Кольцо трактовое	ВТ-9	Обкатка посадочных диаметров роликами
12.	Кольцо промежуточное	ВТ-9	Обдувка микрошариками
13.	Кольцо трактовое	ВТ-9	Обкатка роликами
14.	Кольцо промежуточное	ВТ-9	Обдувка микрошариками
15.	Кольцо промежуточное	ЭП693	Обдувка микрошариками
16.	Проставка	ВТ-9	Обдувка микрошариками
17.	Кольцо трактовое	ВТ-9	Обдувка микрошариками
18.	Валы компрессора	ЭП497	Алмазное выглаживание
19.	Вал компрессора	ЭП693	Виброгалтовка шлиц
20.	Кольцо стопорное	ВТ-9	Пневмодинамическое упрочнение
21.	Болты центрирующие	ЭП479	Обдувка микрошариками
22.	Кольца статора	ЭП693	Пневмодробеструйное упрочнение
23.	Кожух	ВТ-20	Пневмодробеструйное упрочнение
24.	Лабиринт	ВТ-9	Обдувка микрошариками
25.	Болты центрирующие	ЭП693	Обдувка микрошариками
26.	Клапан	ЭП718	Пневмодробеструйное упрочнение

В целом повышение вибрационной стойкости деталей должно проводиться комплексно с использованием всех конструкционных и технологических методов, включающих в себя уменьшение статических напряжений, снижения концентрации напряжений, выбора подходящего материала и методы получения заготов-

ки, применения различных методов упрочняющей обработки поверхности.

Перечень упрочняемых деталей компрессора ГТД семейства «НК» и методы их упрочнения приведены в таблице.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорченко Д. Г. Разработка методов оценки ресурса деталей авиационного ГТД в условиях многокомпонентного нагружения // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6. С. 148–154. [[ D. G. Fedorchenko, "Development of methods to assess the resource details of aircraft turbine engine in a multi-component loading," (in Russian), in *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 15, no. 6, pp. 148-154, 2013. ]]

2. Фалалеев С. В., Новиков Д. К., Балякин В. Б., Седов В. В. Торцовые газодинамические уплотнения. Самара: СНЦ РАН, 2013. 300 с. [[ S. V. Falaleev, D. K. Novikov, V. B. Balyakin, V. V. Sedov, *Mechanical gas dynamic seals*, (in Russian). Samara: SNC RAN, 2013. ]]

3. Федорченко Д. Г., Новиков Д. К. Методы схематизации эксплуатационного цикла изменения напряжений системой элементарных циклов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6. С. 267–271. [[ D. G. Fedorchenko, D. K. Novikov, "Methods of schematization of life cycle changes in the system of voltage elementary cycles," (in Russian) in *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 15, no. 6, pp. 267-271, 2013. ]]

4. Медведев С. Д., Фалалеев С. В., Новиков Д. К., Балякин В. Б. Повышение эксплуатационной надежности ГПА развитием конвертированных авиационных технологий. Самара: СНЦ РАН, 2008. 371 с. [[ S. D. Medvedev, S. V. Falaleev, D. K. Novikov, V. B. Balyakin, *Improving of operational reliability of GPA by converted aircraft technology development*, (in Russian). Samara: SNC RAN, 2008. ]]

## ОБ АВТОРАХ

**ФЕДОРЧЕНКО Дмитрий Геннадьевич**, ген. конструктор, доц. каф. конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. Дипл. инж.-мех. (Куйбышевский авиационный институт (КуАИ), 1972). Канд. техн. наук (КуАИ, 1984). Иссл. и разраб. в обл. прочности, усталости и надежности материалов и конструкций.

**НОВИКОВ Дмитрий Константинович**, проф. каф. конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов. Дипл. инж.-мех. (КуАИ, 1973). Д-р техн. наук (СГАУ, 2001). Иссл. в обл. демпфирования, динамики и прочности.

## METADATA

**Title:** Technological methods to improve the reliability of gas-turbine engine

**Authors:** D. G. Fedorchenko<sup>1</sup>, D. K. Novikov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup>JSC Kuznetsov, Russia,

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Russia.

**E-mail:** <sup>1,2</sup>kipdla@ssau.ru

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 62-66, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Language:** Russian

**Abstract:** One of the main methods to increase the limits of endurance components is the development and introduction of special operations, hardening the surface and reduce the negative impact of technological heredity. The paper considers the influence of surface plastic deformation to increase the endurance limit

**Key words:** technology; endurance limit; fatigue; hardening; surface plastic deformation.

**About authors:**

**FEDORCHENKO, Dmitry Gennadievich**, General Designer, Ass. Prof., Construction and Design of Aircraft Engines Dept. Dipl. Mechanical Eng. (SGAU, 1972). Cand. of Tech. Sci. (SGAU, 1984).

**NOVIKOV, Dmitry Konstantinovich**, Prof., Construction and Design of Aircraft Engines Dept. Dipl. Mechanical Eng. (SGAU, 1973). Dr. Tech. Sci. (SGAU, 2001).