

УДК 539.4.014.13

РАСЧЁТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРГАЕМЫХ УПРОЧНЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

© 2023 А.С. Букатый^{1,2}, Д.В. Евдокимов^{1,2}, Д. А. Бычков², Shudjairi Marwan¹, А.С. Сараев²

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

²АО «Авиаагрегат», г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 15.05.2023

Обеспечение геометрической точности особо ответственных деталей является актуальной задачей предприятий авиационной отрасли. Лопатки газотурбинных двигателей являются особо ответственными и технологически сложными деталями. Как правило, поверхностному дробеструйному упрочнению подвергаются замковые соединения лопаток, а также перо. Остаточные напряжения являются следствием появления технологических остаточных деформаций. Именно остаточные деформации, вызванные действием остаточных напряжений, в большинстве случаев являются причиной брака. Таким образом, разработка научно обоснованных подходов к моделированию остаточных напряжений и расчёту технологических остаточных деформаций является актуальной задачей. В работе изложен подход, позволяющий на стадии механической обработки учитывать деформации, которые могут быть получены на заключительных этапах изготовления деталей после упрочнения поверхностным пластическим деформированием. Подход основан на предварительном расчётном прогнозировании технологических остаточных деформаций от действия остаточных напряжений на основе аналитических и конечно-элементных методов. Реализация подхода показана на примере лопатки компрессора газотурбинного двигателя, подвергаемой упрочнению дробеструйной обработкой по всей поверхности детали.

Ключевые слова: остаточные деформации, остаточные напряжения, технологические допуски, дробеструйное упрочнение, моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-72-76

EDN: KYZ OCD

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей авиадвигателестроения является повышение надёжности и долговечности изделий. Сложность указанной задачи заключается в обеспечении таких параметров как характеристики сопротивления усталости и соответствие геометрических размеров и формы деталей конструкторской документации.

Букатый Алексей Станиславович, доктор технических наук, начальник лаборатории технологических проблем АО «Авиаагрегат», профессор кафедры сопротивления материалов Самарского университета. E-mail: bukaty@inbox.ru

Евдокимов Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Авиаагрегат», доцент кафедр технологий производства двигателей и сопротивления материалов Самарского университета. E-mail: dmitry.evd.ssau@gmail.com

Бычков Дмитрий Анатольевич, ведущий инженер АО «Авиаагрегат». E-mail: db2009@bk.ru

Марван Шуджаири, аспирант кафедры сопротивления материалов Самарского университета. E-mail: sopromat@ssau.ru

Сараев Алексей Сергеевич, аспирант кафедры сопротивления материалов Самарского университета. E-mail: sasss84@yandex.ru

Одним из наиболее распространённых методов повышения сопротивления усталости является упрочнение методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Назначение оптимальных режимов обработки необходимо ввиду того, что упрочняемые детали подвержены короблению от воздействия остаточных напряжений (ОН), создаваемых в поверхностном слое материала.

Изменение размеров и формы деталей при упрочнении на режимах, обеспечивающих наибольший уровень сопротивления усталости, зачастую превышает установленные технологические допуски. Поэтому целью данной работы является разработка методов прогнозирования технологических остаточных деформаций (ТОД) и методик назначения режимов обработки. Применение расчётных методик прогнозирования ТОД на стадии назначения технологических допусков позволяет учесть остаточные деформации деталей после упрочнения и получить соответствие их размеров установленным требованиям, а также компенсировать возможные отклонения, получаемые на предыдущих этапах технологического процесса.

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ**

В основу методики прогнозирования ТОД положена удельная энергия упругой деформации поверхностного слоя лопаток ГТД и энергетический метод назначения оптимальных режимов упрочнения [1], базирующийся на энергии поверхностного пластически деформированного слоя деталей. В качестве начальных напряжений (НН) σ_n в расчётах используются эквивалентные по энергии начальные напряжения, распределённые равномерно по толщине поверхностного слоя. Эквивалентные начальные напряжения позволяют без потери точности значительно упростить расчёты остаточных деформаций, что особенно важно при прогнозировании коробления деталей сложной формы, таких как диски и лопатки ГТД.

Учёт рассчитанных остаточных деформаций, получаемых после упрочнения, необходимо осуществлять на стадии механической обработки. В качестве примера рассмотрена лопатка компрессора газотурбинного двигателя, подвергаемая упрочнению пневмодробеструйной обработкой стальными микрошариками. Основными деформациями, возникающими на заключительной стадии изготовления лопаток ГТД при упрочнении дробеструйной обработкой, являются изгиб пера лопатки и поворот поперечных сечений. Предварительно рассчитывается уровень деформаций, после чего производится корректировка исходных технологических допусков для упреждения изменения размеров и формы лопаток от последующей упрочняющей обработки. Важным преимуществом предложенного метода является возможность его применения в серийном производстве. Упреждение изменения геометрии лопаток позволяет проводить последующую упрочняющую обработку на одном выбранном режиме, обеспечивающем необходимый уровень предела выносливости.

Расчёт остаточных деформаций деталей может осуществляться с помощью аналитических методов, а также с использованием конечно-элементных моделей упрочняемых деталей. Особенностью аналитических методов является небольшая трудоёмкость и простота расчётных схем, отображающих совокупность силовых факторов от воздействия ОН в материале поверхностного слоя детали. Повышение точности расчётов достигается путём использования НН, определяемых методом последовательных приближений из эпюры ОН, полученной с помощью электролитического травления [2]. Результаты предварительных исследований и расчётов показывают, что для деталей, у которых отношение толщины упрочнённого поверхностного слоя к

толщине детали $a/h \leq 0,05$ различие между ОН и НН незначительно и им можно пренебречь.

При прогнозировании ТОД лопаток компрессора ГТД после упрочнения на заданных режимах, необходимо максимально повысить точность расчётов, по результатам которых будет осуществлена корректировка исходных допусков. Повышение точности разработанного метода и упрощение расчётов достигается путём введения понятия удельной энергии поверхностного пластически деформированного слоя a [3]. Использование в расчётах постоянных по толщине слоя эквивалентных начальных напряжений

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_n^2 d\xi}, \quad (1)$$

позволяет повысить точность как аналитических, так и конечно-элементных расчётов.

Лопатки ГТД с небольшими углами закрутки поперечных сечений относятся к деталям типа «стержень», так как их поперечные размеры значительно меньше длины. Для оценки возможных ТОД лопаток используются следующие выражения для определения удлинения и прогибов:

$$\begin{aligned} \Delta l &= -\sigma_3 a \int_0^l \frac{S}{EF} dz, \\ f_x &= \sigma_3 a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_y} \oint_S x ds dz, \\ f_y &= \sigma_3 a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_x} \oint_S y ds dz, \end{aligned} \quad (2)$$

где F, I_x, I_y – площадь и осевые моменты инерции поперечных сечений лопатки; l – длина лопатки, S – длина контура поперечных сечений лопатки, $\Delta l, f_x, f_y$ – удлинение и прогибы лопатки, подвергаемой упрочнению. Выражения для силовых факторов (осевой силы N_z и изгибающих моментов M_η, M_ξ) имеют вид:

$$\begin{aligned} N_z &= -\sigma_3 a S, \\ M_\eta &= -\sigma_3 a \int_S \xi ds, \\ M_\xi &= -\sigma_3 a \int_S \theta r^2 ds. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналитический метод прогнозирования ТОД применяется в расчётах, предполагающих равномерный уровень ОН по всей поверхности лопатки. Этот метод позволяет осуществлять быструю оценку ТОД по представленной расчётной схеме (рис. 1).

В производственных условиях обеспечение геометрической точности лопаток на заключительной стадии изготовления путём смещения исходных технологических допусков требует повышенной точности расчётов. Существую-

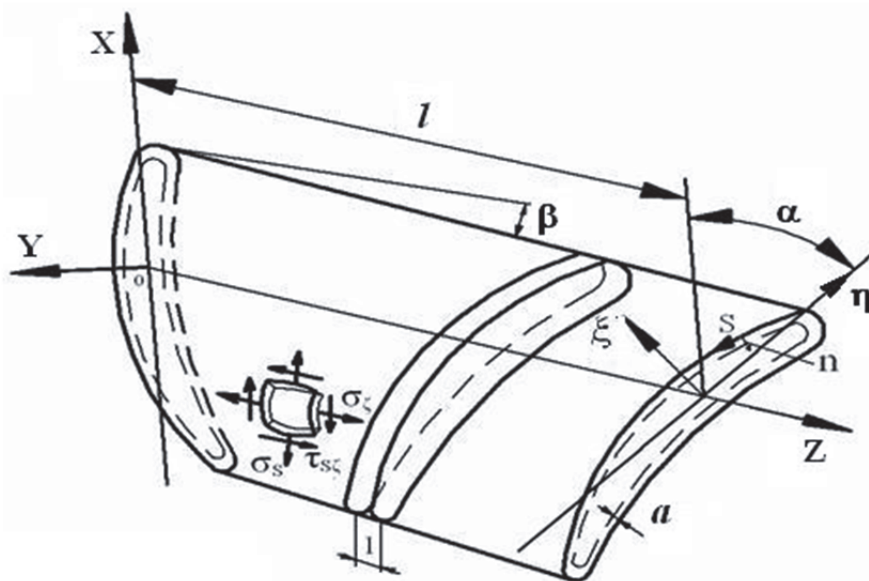


Рис. 1. Система координат естественно закрученного стержня

щие методы, положенные в основу исследований остаточных напряжений и деформаций, основаны на различных теориях и допущениях, позволяющих с определённой точностью моделировать ОН в поверхностном слое деталей. При этом в расчётах может быть использована интегральная величина ОН [4], интегральная величина начальных напряжений НН [5], эквивалентные НН [1]. Усложнение конструкции деталей, технологических процессов и оборудования [6] привело к необходимости совершенствования методов моделирования исследуемых процессов, в результате чего возникла необходимость в использовании численных методов расчёта.

Моделирование НДС деталей с использованием конечно-элементного метода позволило значительно повысить точность вычислений. При этом, помимо уже упомянутых величин напряжений, средства МКЭ позволяют осуществлять загрузку заданной эпюры напряжений в материал поверхностного слоя модели и провести дальнейшие расчёты, моделирующие перераспределение напряжений. Итогом конечно-элементного анализа являются результирующие остаточные напряжения и остаточные деформации детали, используемые при корректировке исходных технологических допусков. Оценочные расчёты позволяют прогнозировать деформации пера лопатки после упрочнения на

двух режимах – минимальном и максимальном, возможных для данной лопатки.

В качестве примера приведена лопатка длиной 120 мм. Построение конечно-элементной модели осуществлялось в системе ANSYS. Упрочнённый поверхностный слой был смоделирован в виде отдельно выделенного объёма, толщина которого равна толщине залегания НН. Объёмы соединены операцией Glue. Для разметки основного объёма лопатки использовались элементы Solid 45. Упрочнённый поверхностный слой размечен элементами Solid-Shell 190. В соответствии с энергетическим методом назначения оптимальных режимов упрочнения в поверхностный слой загружались эквивалентные НН, постоянные по толщине поверхностного слоя, после чего в результате расчёта были получены деформации лопатки и остаточное напряжённое состояние поверхностного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Результаты расчётов представлены в таблице 1, где σ – эквивалентные НН, моделируемые в поверхностном слое лопатки, Δl – удлинение лопатки, f – изменение прогиба, ϕ – изменение угла закрутки пера лопатки. Деформации ко-

Таблица 1. Деформации лопатки газотурбинного двигателя

σ , МПа	Δl , мм	f , мм	ϕ , рад
300	0,3166735	0,317115	0,003216
600	0,039322	0,63423	0,006433

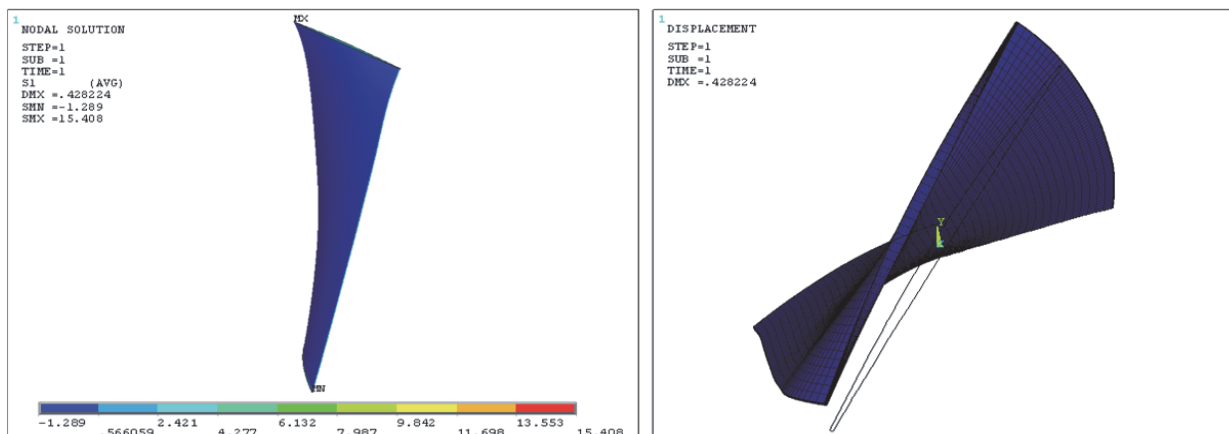


Рис. 2. Деформации лопатки ГТД от ОН после упрочнения ППД

нечно-элементной модели лопатки показаны на рис. 2.

В результате расчётов получены данные, согласно которым, на стадии механической обработки, смещая технологические допуски, представляется возможным изготавливать лопатки с упреждением возможного коробления, получаемого при последующей обработке методами ППД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение упреждающих технологических допусков, основанное на энергетическом методе прогнозирования ТОД деталей после упрочнения методами ППД, позволяет обеспечить геометрические размеры и форму деталей в соответствии с требованиями конструкторской документации, а также устранить отклонения от заданных размеров, возникающие на предыдущих стадиях технологического процесса.

Разработанные подходы применимы в производственных условиях при изготовлении деталей сложной формы, подверженных короблению.

Применение разработанной методики определения эквивалентных начальных напряжений позволяет значительно упростить и ускорить расчёты ТОД методом конечных элементов в системе ANSYS.

Проведённые расчёты указывают на возможность применения постоянного режима упрочнения для всех поверхностей при обработке деталей сложной формы, что значительно уменьшает трудоёмкость работ по обеспечению их геометрической точности и доказывает возможность применения представленных методик в серийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатый, С.А. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостен-

ных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием / С.А. Букатый, А.С. Букатый // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 10(67). – С. 45–49.

2. Букатый, С.А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений / С.А. Букатый, А. С. Букатый // *Механика и процессы управления. Труды XXXVIII Уральского семинара. Том 1.* – Екатеринбург: УрО РАН, Миасс – 2008. – 258 с. С. 191–194.
3. Букатый А.С. Применение удельной энергии упругой деформации поверхностного слоя для прогнозирования технологических остаточных деформаций деталей после упрочнения методом ППД / А.С. Букатый, А.А. Иванов // *Механика и процессы управления. Труды XXXIX Уральского семинара, посвящённого 85-летию со дня рожд. акад. В.П. Макеева.* – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 422 с. С.88 – 95.
4. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трёх томах. Том 1. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 831с.
5. Овсеенко, А. Н. Технологические остаточные деформации и методы их снижения / А.Н. Овсеенко // *Вестник машиностроения.* – М.: Машиностроение, 1991. № 2. – С. 58–61.
6. Смирнов, Г.В. Совершенствование технологии окончательной электрохимической размерной обработки лопаток ГТД с учётом технологической наследственности: Монография / Г.В. Смирнов. – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 112 с.

TECHNOLOGICAL RESIDUAL DEFORMATIONS CALCULATING FOR AVIATION PARTS SUBJECTED TO SHOT PEENING STRENGTHENING

© 2023 A.S. Bukaty^{1,2}, D.V. Evdokimov^{1,2}, D.A. Bychkov², Shudjairi Marwan¹, A.S. Saraev²

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² JSC Aviaagregat, Samara, Russia

Ensuring the geometric accuracy of critical parts is an actual problem for aviation industry enterprises. The blades of gas turbine engines are particularly critical and technologically complex parts. In most cases, the interlocks of the blades, as well as the blade, are subjected to surface shot peening. Residual stresses are the first cause of the appearance of technological residual deformations. It is the residual deformations caused by the action of residual stresses that in most cases are the cause of critical defects of parts. Thus, the development of scientifically based approaches to modeling residual stresses and calculating technological residual deformations is an actual task. The paper presents an approach that allows at the stage of machining to take into account the deformations that can be obtained at the final stages of manufacturing parts after shot peening strengthening. The approach is based on preliminary computational prediction of technological residual deformations from the action of residual stresses based on analytical and finite element methods. The implementation of the approach is shown on the example of a compressor blade of a gas turbine engine, subjected to hardening by shot peening over the entire surface of the part.

Keywords: residual deformations, residual stresses, technological tolerances, shot peening strengthening, modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-72-76

EDN: KYZOC

REFERENCES

1. Bukatyj S.A. Energeticheskij metod opredeleniya racional'nyh rezhimov uprochneniya tonkostennyh i malozhyostkih detalej GTD poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / S.A. Bukatyj, A.S. Bukatyj // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2009. – № 10(67). – S. 45–49.
2. Bukatyj, S.A. Avtomatizirovannaya sistema opredeleniya ostatochnykh napryazhenij / S.A. Bukatyj, A.S. Bukatyj // Mekhanika i processy upravleniya. Trudy XXXVIII Ural'skogo seminar. Tom 1. – Ekaterinburg: UrO RAN, Miass – 2008. – S. 191–194.
3. Bukatyj, A.S. Primenenie udel'noj energii uprugoj deformacii poverhnostnogo sloya dlya prognozirovaniya tekhnologicheskikh ostatochnykh deformacij detalej posle uprochneniya metodom PPD / A.S. Bukatyj, A.A. Ivanov // Mekhanika i processy upravleniya. Trudy HKHKHIIH Ural'skogo seminar, posvyashchyonnogo 85-letiyu so dnya rozhd. akad. V.P. Makeeva. – Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. – S. 88–95.
4. Prochnost', ustojchivost', kolebaniya. Spravochnik v tryoh tomah. Tom 1. Pod red. I.A. Birgera i YA.G. Panovko. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 831 s.
5. Ovseenko, A.N. Tekhnologicheskie ostatochnye deformacii i metody ih snizheniya [Tekst] / A.N. Ovseenko // Vestnik mashinostroeniya. – M.: Mashinostroenie, – 1991. – № 2. – S. 58–61.
6. Smirnov, G.V. Sovershenstvovanie tekhnologii okonchatel'noj elektrohimicheskoy razmernoj obrabotki lopatok GTD s uchytom tekhnologicheskoy nasledstvennosti: Monografiya / G.V. Smirnov. – Samara: SNC RAN, 2004. – 112 s.

Aleksey Bukaty, Doctor of Technics, Professor at the Material Resistance Department of Samara National Research University, Head of the Technology Problems Department of JSC Aviaagregat. E-mail: bukaty@inbox.ru

Dmitry Evdokimov, Ph. D. of Engineering Sciences, Senior Project Engineer of JSC Aviaagregat, Assistant Professor of the Material Resistance and Engine production technologies Departments of Samara National Research University. E-mail: dmitry.evd.ssau@gmail.com

Dmitry Bychkov, Senior Project Engineer of JSC Aviaagregat. E-mail: db2009@bk.ru

Shudjairi Marwan Adil Hashim, Ph. D. Student of the Material Resistance Department of Samara National Research University. E-mail: sopromat@ssau.ru

Aleksey Saraev, Ph. D. Student of the Material Resistance Department of Samara National Research University. E-mail: sasss84@yandex.ru