

РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛОПАТОК ГТД НА ЭТАПЕ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

© 2021 Д.В. Евдокимов^{1,2}, Д.Л. Скуратов¹, А.С. Букатый^{1,2}

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

² АО «Авиаагрегат», Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 31.01.2022

В статье представлена методика, позволяющая прогнозировать технологические остаточные деформации лопаток ГТД, получаемые на этапах концевого фрезерования вследствие действия остаточных напряжений. Первая часть методики позволяет определять величину, знак и характер распределения остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое заготовок на операциях концевого фрезерования. Адекватность методики проверена исследованием сходимости результатов расчетов с результатами натурных экспериментов. В результате исследований получена степенная зависимость, позволяющая определять величину максимальных окружных остаточных напряжений в зависимости от параметров режима обработки. Вторая часть методики позволяет определять остаточные деформации лопатки ГТД на основе эпюр остаточных напряжений, полученных при реализации первой части методики или на основе экспериментальных исследований. Также в работе получены степенные зависимости, позволяющие определять величину максимальных отклонений контрольных сечений исследуемой лопатки ГТД в зависимости от параметров режима концевого фрезерования.

Ключевые слова: фрезерование, остаточные напряжения, остаточные деформации, геометрическая точность, отклонения, степенные зависимости, конечно-элементная модель, обработка, симуляция процесса резания, Abaqus Explicit Dynamic.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19

Для современного машиностроения характерна устойчивая тенденция к усложнению промышленных изделий и использованию материалов, вызывающих сложности при механической обработке. В первую очередь это касается изделий авиационной техники. Данная тенденция во многих случаях приводит к необходимости изготовления высокоточных деталей со сложным фасонным профилем, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и высоких температур. Поэтому при изготовлении таких деталей большое внимание уделяется состоянию поверхностного слоя, определяющего в значительной мере надежность и долговечность детали и изделия в целом [1, 2].

Значительное место в технологических процессах изготовления деталей отводится опера-

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

Скуратов Дмитрий Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей Самарского университета. E-mail: skuratov@ssau.ru

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

циям фрезерования, в особенности это относится к производству маложестких деталей со сложным фасонным профилем, где наибольшее применение находят концевые фрезы. При этом нередко операции фрезерования являются окончательными операциями, на которых обеспечивается заданная геометрическая точность, шероховатость поверхности. При этом остаточные напряжения, сформированные на заключительных стадиях технологического процесса, оказывают большое влияние не только на усталостную прочность изделия, но и на ее геометрическую точность, поскольку являются основной причиной появления технологических остаточных деформаций [3], которые зачастую превышают технологические допуски.

В настоящей статье рассматривается влияние остаточных напряжений, сформированных на этапах концевого фрезерования на геометрическую точность лопатки компрессора газотурбинного двигателя семейства «НК». Для этого была использована методика [4], предназначенная для определения технологических остаточных деформаций в лопатке ГТД после операций ППД. Указанная методика реализована на лопатках ГТД, однако стоит отметить, что методика является обобщенной, применимой к деталям произвольной геометрической формы. Еще одной особенностью данной методики является то, что в конечно-элементной модели

рассматривается не симуляция взаимодействия лопатки и упрочняющей среды, а используются в качестве исходных данных эпюры остаточных напряжений, полученные расчетным или экспериментальным путем. Таким образом, эпюра остаточных напряжений применяется в качестве исходных данных для моделирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя конечно-элементной модели лопатки. Этот же подход был использован для операций концевой фрезеровки в настоящем исследовании.

Таким образом, в соответствии с указанной методикой первоначально была разработана геометрическая модель лопатки компрессора ГТД семейства «НК» в программном комплексе *SolidWorks* (рис. 1), а затем уже разработанная виртуальная модель была экспортирована в программу конечно-элементного анализа *ANSYS*, для разработки конечно-элементной модели, вид которой представлен на рис. 2.

Конечно-элементная модель была разбита на два типа конечных элементов с четкой границей перехода, образующих основное тело лопатки и поверхностный слой, в котором на основе внесения соответствующих эпюр формируются остаточные напряжения. Следует отметить, что данный этап построения конечно-элементной модели сопровождался определенными трудностями, обусловленными, во-первых, незначительной толщиной поверхностного слоя, а, во-вторых, подбором оптимального типа конечных элементов. Выбранный тип конечных элементов должен был обеспечить возможность загрузки эпюр остаточных напряжений, определяющих напряженно-деформированное состояние лопатки. Поэтому, исходя из ранее изложенного, при построении конечно-элементной модели для разбиения поверхностного слоя были использованы элементы *Solid-shell*

190, *Solid-shell* 181, *Solid* 95, а для основного тела лопатки – *Solid* 45. Примечательной особенностью элементов поверхностного слоя является то, что эти элементы могут быть поделены на заданное количество слоев, каждый из которых содержит точки интерполяции. Причем выбор количества слоев, на которые разбивается конечный элемент, зависит от количества точек, необходимых для построения эпюры остаточных напряжений.

С целью увеличения точности определения технологических остаточных деформаций в работах [4, 5] рекомендуется использовать начальные напряжения, получаемые расчетным путем из эпюры остаточных напряжений. Моделирование начальных напряжений позволяет реализовать в конечно-элементной модели процесс перераспределения начальных напряжений и образования остаточных напряжений и остаточных деформаций.

Согласно работам [4, 5] существует два способа определения начальных напряжений. Первый способ основан на решении интегрального уравнения, приведенного в работе [6]. Второй способ базируется на методе последовательных приближений [7]. Кроме того, что начальные напряжения возможно определить различными способами, их можно привести к различному виду, пригодному для загрузки в поверхностный слой конечно-элементной модели. На рис. 3 приведена схема исходных данных, в виде остаточных и начальных напряжений пригодных для использования в конечно-элементной модели.

Как видно из рис. 3 начальные напряжения можно приводить к упрощенному виду, а именно, к некоторой эквивалентной и постоянной по глубине слоя величине $\sigma_{э,н}$, которая может быть определена подходами [7, 8]. В работе использована методика, отличающаяся повышенной точностью и основанная на использовании



Рис. 1. Геометрическая модель газодинамической части лопатки компрессора ГТД семейства «НК», созданная в программном комплексе *SolidWorks*



Рис. 2. Конечно-элементная модель газодинамической части лопатки компрессора ГТД семейства «НК», созданная в программном комплексе *ANSYS*

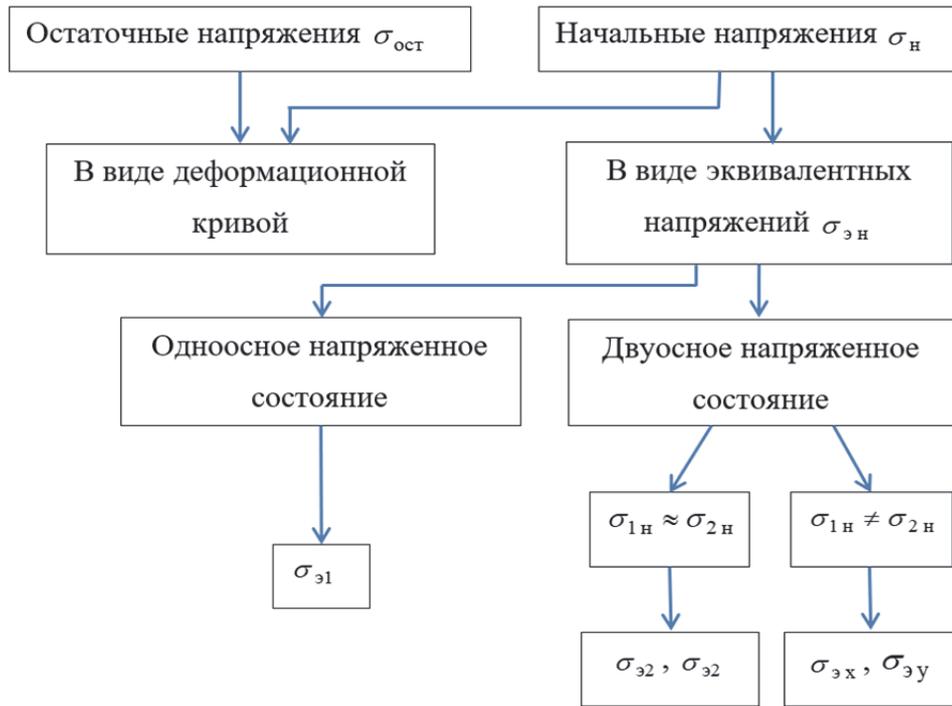


Рис. 3. Схема выбора исходных данных для конечно-элементной модели исследуемого изделия (лопатки)

закона сохранения энергии, согласно которому энергия упругой деформации деталей U_d (т.е. энергия технологических остаточных напряжений [7]) связана с энергией поверхностного слоя U_a . Удельная энергия деформированного поверхностного слоя может быть определена из выражения, приведенного в работе [5]:

$$u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_{1n}^2 + \sigma_{2n}^2 + \sigma_{3n}^2 - 2\mu(\sigma_{1n}\sigma_{2n} + \sigma_{2n}\sigma_{3n} + \sigma_{3n}\sigma_{1n})],$$

где $\sigma_{1n}, \sigma_{2n}, \sigma_{3n}$ – главные начальные напряжения. Данное выражение также можно представить и в другом виде [7]:

$$u_0 = \frac{\sigma_n^2}{(1-\mu) \cdot E},$$

если $\sigma_{3n} \approx 0$, а $\sigma_{1n} \approx \sigma_{2n}$. В том случае, если в поверхностном слое детали начальные напряжения $\sigma_{1n} \neq \sigma_{2n}$, эквивалентных величин σ_{3n} будет две (σ_{3x}, σ_{3y}). Получить выражения для их определения можно по алгоритму, представленному в работах [4, 5].

Согласно рекомендациям из трудов [3-5] детали, имеющие сложную фасонную форму, в число которых входят лопатки ГТД, должны анализироваться при использовании формулы, учитывающей двухосное напряженное состояние:

$$\sigma_{32} = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{\frac{1}{\xi_e} \int_0^{\xi_e} \sigma_n^2 d\xi_a}.$$

В работе использовались эпюры остаточных напряжений, формируемые при концевом фрезеровании и полученные в результате проведе-

ния численного полнофакторного эксперимента по разработанной методике [9]. Методика базируется на симуляционной конечно-элементной модели, позволяющей строить расчетные объемные эпюры остаточных напряжений (ОН) в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. Конечно-элементная модель выполнена в постановке явной динамики, чаще всего обозначаемой в программах конечно-элементного анализа как «Explicit Dynamic» и имеет типовую структуру построения, а именно, содержит два виртуальных конечно-элементных тела разработанных в программе SolidWorks и экспортированных в ABAQUS, из которых первое тело это рабочая часть концевой фрезы, а второе обрабатываемая заготовка (рис. 4).

Для конечно-элементных тел были заданы исходные данные, необходимые для вычислений: физико-механические характеристики материалов, коэффициенты уравнения, описывающего пластическое поведение заготовки в процессе симуляции резания [10, 11], коэффициенты уравнения, описывающего процесс разрушения материала заготовки в зоне резания [11], кинематика виртуальных тел, соответствующая рассматриваемым в ходе численного эксперимента режимам обработки и результаты расчетов температурных полей. Данные полей температур соответствуют применяемым режимам обработки и определены с помощью методики, представленной в работе [12].

При проведении численного эксперимента определялись окружные остаточные напряжения. Варьируемыми параметрами режима

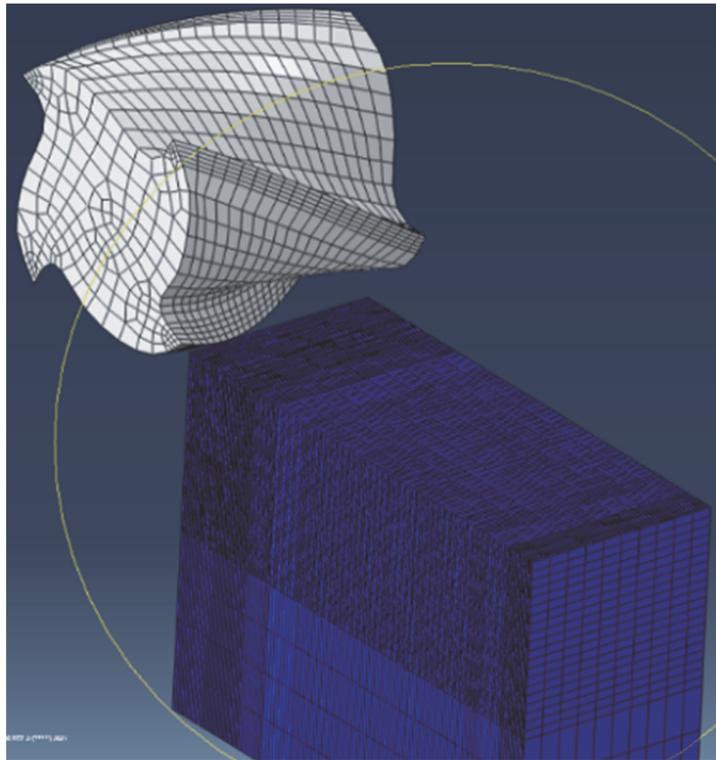
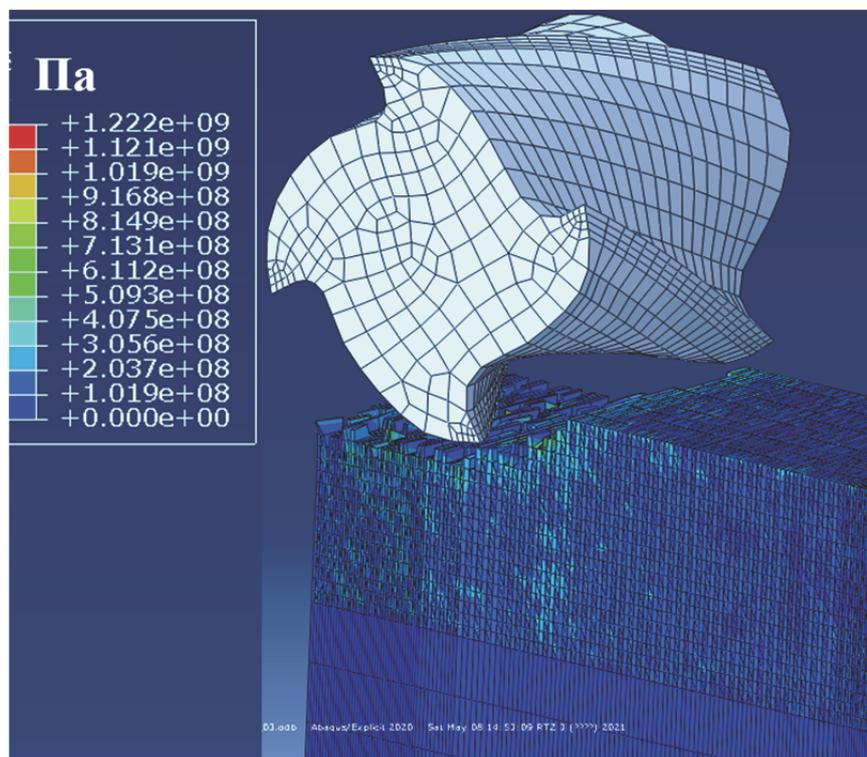


Рис. 4. Виртуальная конечно-элементная модель процесса концевой фрезерования

резания являлись: скорость резания U , подача на зуб S_z , глубина фрезерования t . Диапазоны варьирования указанных параметров были следующие: $U = 23,8...37,7$ м/мин, $S_z = 0,04...0,08$ мм/зуб, $t = 0,5...1,5$ мм. Пример симуляции процесса концевой фрезерования по разработан-

ной конечно-элементной модели представлен на рис. 5.

Кроме того, с целью проверки адекватности методики для определения величины, знака и характера распределения остаточных напряжений по конечно-элементной модели, созданной



Режим резания: $U = 30$ м/мин; $S_M = 250$ мм/мин ($S_z = 0,08$ мм/зуб); $t = 1,5$ мм, $B = 8$ мм

Рис. 5. Конечно-элементная модель процесса резания для определения величины, знака и характера распределения ОН

в программном комплексе ABAQUS, был проведен полнофакторный натурный эксперимент, при этом параметры режимов соответствовали режимам, использованным для численного эксперимента. Результат исследования сходимости численного и натурального полнофакторного эксперимента отражен в табл. 1. Пример распределения окружных остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок обработанных в ходе натурального эксперимента представлен на рис. 6.

Проведенный натурный полнофакторный эксперимент позволил не только оценить точность разработанной методики, но и позволил получить степенную зависимость, связывающую величину максимальных окружных напряжений с параметрами режима обработки:

$$(\sigma_{\tau} - \mu\sigma_o)_{\max} = 197,6 \cdot v^{0,107} S_z^{0,372}$$

Как видно из данной формулы, она не содержит параметр t (глубину резания). Этот па-

раметр был исключен на этапе проверки значимости коэффициентов регрессии.

Таким образом, в представленных исследованиях эпюры остаточных напряжений, соответствующие выбранным режимам конечного фрезерования и составляющие матрицу полнофакторного эксперимента, были использованы для определения начальных напряжений. Начальные напряжения моделировались в поверхностном слое конечно-элементной модели лопатки, после чего был выполнен расчет технологических остаточных деформаций. Лопатка была разделена на 7 контрольных сечений, каждое из которых соответствует контролируемому сечению реальной лопатки. И по результату расчета каждое сечение было проанализировано относительно его номинального положения. Деформации профиля в одном из сечений лопатки показаны на рис. 7.

Таким образом, с каждого контрольного сечения значения максимальных величин отклонений и поворота от номинального сечения были

Таблица 1. Результаты сходимости натурального и численного экспериментов (глубина фрезерования $t = 1,5$ мм.)

v , м/мин	S_z , мм/зуб	$\sigma_{\tau} - \mu\sigma_o$, МПа		Δ , %
		Натурный эксперимент	Численный расчет по модели	
23,8	0.04	96,3	97,3	1.1
	0.06	107,2	120,8	12.7
	0.08	115	101,2	12
37.7	0.04	85	82,4	3.1
	0.06	110	107,7	2.1
	0.08	127,7	128,6	0.7

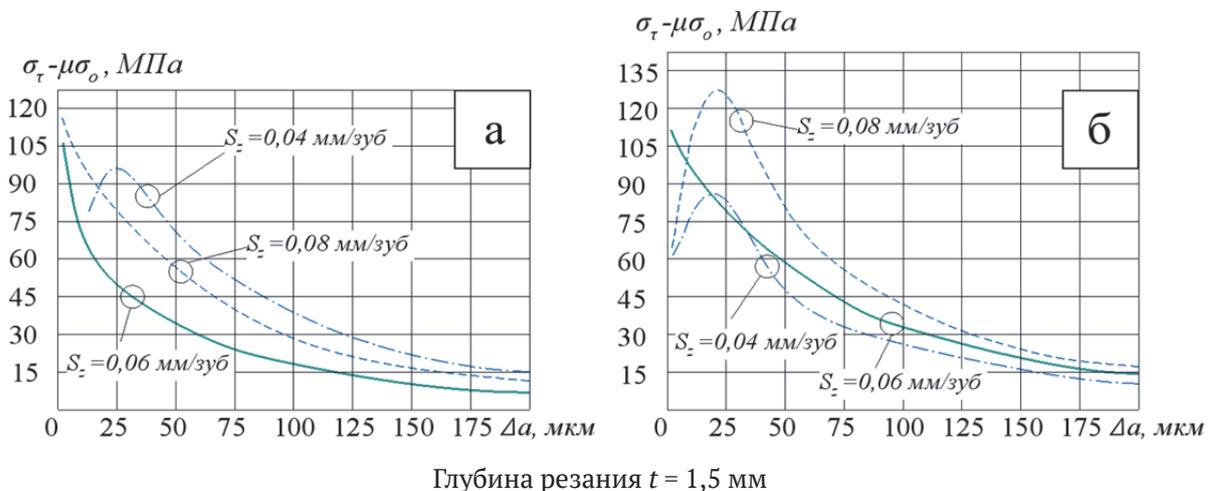


Рис. 6. Влияние подачи на зуб S_z при скоростях резания $v = 23,8$ м/мин (а) и $v = 37,7$ м/мин (б) на величину и характер распределения окружных остаточных напряжений при концевом фрезеровании

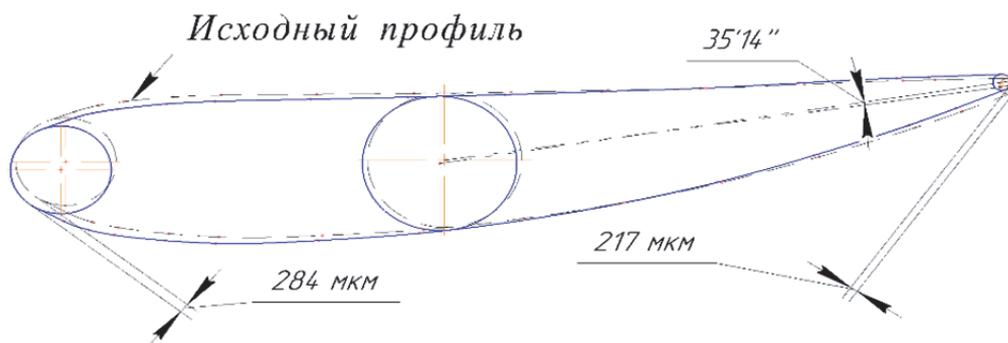


Рис. 7. Пример смещения деформированного профиля сечения №5 лопатки компрессора относительно номинального положения с указанием двух максимальных отклонений

Таблица 2. Максимальные отклонения контрольных профилей пера лопатки от номинальных положений соответствующих профилей (глубина фрезерования $t = 0,5$ мм)

v , м/мин	S_z , мм/зуб	Максимальное смещение профиля от номинального положения, мкм						
		Номера контрольных профилей сечений						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
23,8	0,04	2	37	71	140	210	279	311
	0,06	3	44	86	169	252	336	375
	0,08	2	33	63	125	186	247	276
37,7	0,04	2	26	50	97	145	193	216
	0,06	1	20	38	76	113	150	168
	0,08	2	35	68	134	200	267	298

Таблица 3. Максимальные величины поворота контрольных профилей пера лопатки относительно номинальных положений (глубина фрезерования $t = 0,5$ мм)

v , м/мин	S_z , мм/зуб	Максимальный поворот профиля						
		Номера контрольных профилей сечений						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
23,8	0,04	19''	5'24''	10'28''	20'37''	30'45''	40'54''	45'40''
	0,06	19''	5'10''	10'1''	19'44''	29'27''	39'10''	43'43''
	0,08	13''	3'41''	7'9''	14'4''	21'	27'55''	31'10''
37,7	0,04	10''	2'51''	5'31''	10'52''	16'13''	21'33''	24'4''
	0,06	8''	2'10''	4'11''	8'16''	12'19''	16'23''	18'17''
	0,08	14''	3'57''	7'40''	15'6''	22'31''	29'57''	33'26''

занесены в таблицы. Пример для глубины фрезерования $t = 0,5$ мм представлен в табл. 2 и 3.

Исходя из полученных значений, возможно осуществлять подбор режимов фрезерования таким образом, чтобы остаточные деформации после обработки не вывели контрольные контура лопатки за пределы допуска. Для рассматриваемой в работе лопатке, по полученным в ходе численного данным, были составлены эмпирические зависимости, позволяющие определять для каждого из 7 сечений величину максимального отклонения контрольного контура в зависимости от параметров режима обработки (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований разработана методика, позволяющая прогнозировать технологические остаточные деформации лопаток ГТД, получаемые на этапах конечного фрезерования вследствие действия остаточных напряжений. Методика состоит из двух частей. Первая часть позволяет определить величины знака и характера распределения остаточных напряжений на этапах конечного фрезерования. Вторая часть содержит методику построения конечно-элементных моделей, алгоритмы аналитического определения начальных напряжений

Таблица 4. Эмпирические зависимости для определения максимальных величин смещения *i*-го контрольного профиля в зависимости от режима обработки

Номер контрольного профиля	Эмпирическая зависимость	Номер контрольного профиля	Эмпирическая зависимость
1	$\delta_1 = 7 \cdot \frac{S_z^{0,146} t^{0,277}}{v^{0,219}}$	5	$\delta_5 = 835 \cdot \frac{S_z^{0,188} t^{0,295}}{v^{0,275}}$
2	$\delta_2 = 144 \cdot \frac{S_z^{0,175} t^{0,287}}{v^{0,277}}$	6	$\delta_6 = 1087 \cdot \frac{S_z^{0,188} t^{0,295}}{v^{0,269}}$
3	$\delta_3 = 261 \cdot \frac{S_z^{0,18} t^{0,297}}{v^{0,257}}$	7	$\delta_7 = 1224 \cdot \frac{S_z^{0,188} t^{0,294}}{v^{0,271}}$
4	$\delta_4 = 564 \cdot \frac{S_z^{0,192} t^{0,297}}{v^{0,275}}$	-	-

и задания исходного напряженного состояния поверхностного слоя на примере лопатки ГТД. Точность первой части методики была оценена в ходе сопоставления результатов, полученных численными методами с результатами натурного полнофакторного эксперимента, где расхождение между выходными данными не превысило 12,7%.

По разработанной методике проведен численный полнофакторный эксперимент, построены степенные зависимости, позволяющие определять величину максимальных отклонений контрольных сечений лопатки ГТД относительно их номинальных положений в зависимости от режима концевой фрезерования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов, В.М.* Основы надежности газотурбинных двигателей / В.М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. *Кравченко, Б.А.* Механизм формирования остаточных напряжений при свободном резании закаленных сталей / Б.А. Кравченко, В.Г Круцило. // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов: межвуз. (межвед.) тематич. сб. науч. тр. – 1980. – № 2. – С. 91-97.
3. *Букатый, С.А.* Прогнозирование технологических остаточных деформаций тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования / С.А. Букатый, А.П. Кондратов, А.С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – 2006. – № 2(10). – Ч.2. – С. 91-95.
4. *Букатый, А.С.* Конечно-элементное моделирование и исследование остаточных напряжений и деформаций деталей после дробеструйного упрочнения / А.С. Букатый // Вестник машиностроения. – 2016. – № 6. – С. 52-57.
5. *Букатый, С.А.* Энергетический метод определения

рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложестких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием / С.А. Букатый, А.С. Букатый // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 45-49.

6. *Овсеенко, А.Н.* Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08: защищена 01.02.06 / Овсеенко Александр Николаевич. – М., 2006. – 32 с.
7. *Букатый, С.А.* Общий подход к определению остаточных деформаций деталей после упрочнения поверхностным и объемным пластическим деформированием / С.А. Букатый // Повышение качества деталей машин пластическим деформированием: тез. докл. республ. науч.-техн. конф. – Фрунзе, 1988. – С. 88-90.
8. *Смирнов, Г.В.* Совершенствование технологии окончательной электрохимической размерной обработки лопаток ГТД с учетом технологической наследственности. Монография / Г.В. Смирнов. – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 112 с.
9. *Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G.* Influence of Tool Wear on the Heat Flux Distribution and Temperature at the Contact Surfaces in the End Milling of OT4 Titanium Alloy // Russian Engineering Research, Allerton Press. Inc. 2016. V. 36, no. 4. P. 324–327.
10. *Евдокимов, Д.В.* Методика расчета составляющих силы резания при концевом фрезеровании на базе феноменологической модели Джонсона-Кука / Д.В. Евдокимов, Д.Л. Скуратов // СТИН. –2017. – № 1. – С. 29-33.
11. *Failure Modeling of Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model: research report (conclusion): Lawrence Livermore National Laboratory; chief Kay G.; executors: Lesuer, D [et al.]. Springfield: National Technical Information Service (NTIS), 2003. 17 p. № DOT/FAA/AR-03/57.*
12. *Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G.* Thermal Fields in the End Milling of VT6 Titanium Alloy with Cooling // Russian Engineering Research. 2015. №35(10). pp. 773-776.

TECHNOLOGICAL RESIDUAL DEFORMATIONS PREDICTION OF GTE BLADES BY NUMERICAL METHOD AFTER END MILLING

© 2021 D.V. Evdokimov^{1,2}, D.L. Skuratov¹, A.S. Bukaty^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² JSC Aviaagregat, Samara, Russia

The article presents a technique that makes it possible to predict the technological residual deformations of GTE blades obtained at the stages of end milling as a result of the effect of residual stresses. The first part of the technique makes it possible to determine the magnitude, bijugat and character of the residual stresses distribution formed in the surface layer of the workpieces in the operations of end milling. The adequacy of the technique was verified by investigating the convergence of the numerical computation results with the results of field experiments. As a result of the research, a power-law dependence was obtained, which makes it possible to determine the value of the maximum circumferential residual stresses depending on the parameters of the end milling processing mode. The second part of the technique makes it possible to determine the residual deformations of the GTE blade based on the residual stress distribution diagrams obtained when using of the first part of the technique or obtained on the basis of field experimental investigations. Also, power-law dependences are obtained in this work, which make it possible to determine the value of the maximum deviations of the control sections of the investigated GTE blade, depending on the parameters of the end milling mode.

Keywords: milling, residual stress, residual deformation, geometrical accuracy, deviations, power-law dependence, finite element model, machining, cutting simulation, Abaqus Explicit Dynamic.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-11-19

REFERENCES

1. Akimov, V.M. Osnovy nadezhnosti gazoturbinnih dvigatelej [Gas turbine engine reliability fundamentals] / V.M. Akimov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 207 p.
2. Kravchenko, B.A. The mechanism of formation of residual stresses during free cutting of hardened steels / B.A. Kravchenko, V.G. Krucilo // Obrabotka vysokoprochnyh stalej i splavov instrumentami iz sverhtverdyh sinteticheskikh materialov: mezhvuz. (mezhved.) tematich. sb. nauch. tr. – 1980. – № 2. – P. 91-97. (In Russ.).
3. Bukaty, S.A. Prediction of technological residual deformations of thin-walled discs after hardening by surface plastic deformation / S.A. Bukaty, A.P. Kondratov, A.S. Bukatyj // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva. – 2006. – № 2(10). – Ch.2. – P. 91-95. (In Russ.).
4. Bukaty, A.S. Finite element modeling and study of residual stresses and deformations of parts after shot peening / A.S. Bukaty // Vestnik mashinostroeniya. – 2016. – № 6. – P. 52-57. (In Russ.).
5. Bukaty, S.A. Energy method for determining rational modes of hardening of thin-walled and low-stiff GTE parts by surface plastic deformation / S.A. Bukaty, A.S. Bukatyj // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2009. – № 10(67). – P. 45-49. (In Russ.).
6. Ovseenko, A.N. Tekhnologicheskie osnovy metodov snizheniya ostatochnyh deformacij i obespecheniya kachestva obrabotki vysokonagruzhennyh detalej energomashin. avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk. [Technological foundations of methods for reducing residual deformations and ensuring the quality of processing of highly loaded parts of power machines. Doc. eng. sci. diss] / A.N. Ovseenko. Moscow, 2006. 32 p.
7. Bukaty, S.A. General approach to the determination of residual deformations of parts after hardening by surface and volumetric plastic deformation / S.A. Bukaty // Povyshenie kachestva detalej mashin plasticheskim deformirovaniem: tez. dokl. respubl. nauch.-tekhn. konf. Frunze, 1988. P. 88-90. (In Russ.).
8. Smirnov, G.V. Sovershenstvovanie tekhnologii okonchatel'noj elektrohimicheskoy razmernoj obrabotki lopatok GTD s uchyotom tekhnologicheskoy nasledstvennosti [Improvement of the technology of final electrochemical dimensional processing of GTE blades, taking into account technological heredity] / G.V. Smirnov. Samara: SNC RAN, – 2004. – 112 p.
9. Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G. Influence of Tool Wear on the Heat Flux Distribution and Temperature at the Contact Surfaces in the End Milling of OT4 Titanium Alloy // Russian Engineering Research, Allerton Press. Inc. – 2016. – V. 36, no. 4. – P. 324-327.
10. Evdokimov, D.V. Method for calculating the components of the cutting force in end milling based on the phenomenological Johnson-Cook model / D.V.

- Evdokimov, D.L. Skuratov // STIN. – 2017. – № 1. – P. 29-33. (In Russ.)
11. Failure Modeling of Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model: research report (conclusion): Lawrence Livermore National Laboratory; chief. Kay G.; executors: Lesuer, D [et al.]. Springfield: National Technical Information Service (NTIS), 2003. 17 p. № DOT/FAA/AR-03/57.
12. Evdokimov D.V., Skuratov D.L., Fedorov D.G. Thermal Fields in the End Milling of VT6 Titanium Alloy with Cooling // Russian Engineering Research. 2015. № 35(10). pp. 773-776.

Dmitry Evdokimov, Senior Project Engineer of JSC Aviaagregat, Assistant Lecturer of the Material Resistance and Engine Production Technologies Departments of Samara National Research University.

E-mail: dmitry.evd.ssau@gmail.com

Dmitry Skuratov, Doctor of Technics, Professor at the Engine Production Technologies Department of Samara National Research University. E-mail: skuratov@ssau.ru

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