

пределах технологических допусков, при этом упрочнение наиболее нагруженных зон детали было выполнено с применением более интенсивных режимов упрочняющей обработки относительно режимов, применяемых на основных поверхностях траверсы.

Список использованных источников

1. Букатый С.А., Семенченко И.В. Коробление и размерная стабильность маложёстких тонкостенных деталей в производстве газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1994. – № 10. – С. 32-37.

2. Букатый С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала: автореф. ... докт. техн. наук: 05.07.05, 01.02.06 / С.А. Букатый. – Рыбинск, 1996. – 28 с.

3. Букатый А.С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учётом геометрии упрочняемых деталей [Текст] / А. С. Букатый // Авиация и космонавтика 2008: Тезисы седьмой международной конференции. Тезисы докладов – Москва: МАИ, 2008. – 236 с. – С. 68.

УДК 621.787:4

*С.А. Букатый, А.С. Букатый, С.А. Сайкин,
А.В. Евграфов, Л.Ф.А. Санхинес*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Введение. Актуальной задачей авиационного производства 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. Одним из наиболее распространённых методов повышения сопротивления усталости является упрочнение методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Назначение оптимальных режимов обработки необходимо, поскольку 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 особое внимание уделяется разработке 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.

Расчётное прогнозирование 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 [3]. Использование в расчётах постоянных по толщине слоя эквивалентных начальных напряжений

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

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:

$$\Delta l = -\sigma_s a \int_0^l \frac{S}{EF} dz, \quad f_x = \sigma_s a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_y} \left[\int_S x ds \right] dz, \quad f_y = \sigma_s a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_x} \left[\int_S y ds \right] dz, \quad (2)$$

где F , I_x , I_y – площадь и осевые моменты инерции поперечных сечений лопатки; l – длина лопатки, S – длина контура поперечных сечений лопатки, Δl , 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:

$$N_z = -\sigma_s a S, M_\eta = -\sigma_s a \int_S \xi ds, M_\xi = -\sigma_s a \int_S \theta r^2 ds. \quad (3)$$

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).

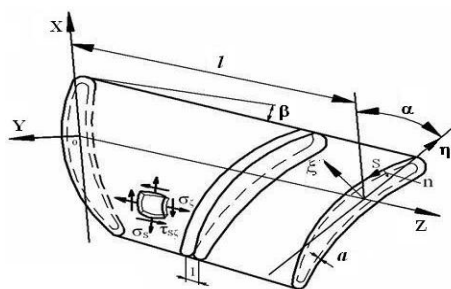


Рис. 1. Система координат естественно закрученного стержня

В производственных условиях обеспечение геометрической точности лопаток на заключительной стадии изготовления путём смещения исходных технологических допусков требует повышенной точности расчётов. Существующие 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 расчётов представлены в табл. 1, где σ – эквивалентные НН, моделируемые в поверхностном слое лопатки, Δl – удлинение лопатки, f – изменение прогиба, φ – изменение угла закрутки пера лопатки. Деформации конечно-элементной модели лопатки показаны на рис. 2.

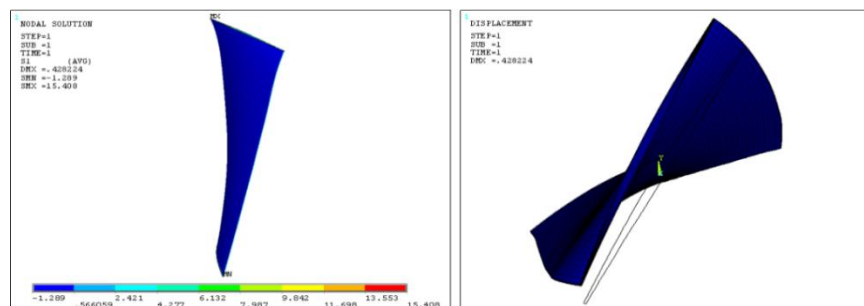


Рис. 2. Деформации лопатки ГТД от ОН после упрочнения ППД

Табл. 1

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

В результате расчётов получены данные, согласно которым, на стадии механической обработки, смещая технологические допуски, представляется возможным изготавливать лопадки 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. 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 использованных источников

1. Букатый С.А., Букатый А.С. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 45–49.
2. Букатый С.А., Букатый А.С. Автоматизированная система определения остаточных напряжений // Механика и процессы управления. Труды XXXVIII Уральского семинара. Том 1. – Екатеринбург: УрО РАН, Миасс – 2008. – 258 с. С. 191–194.
3. 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. Овсенко А. Н. Технологические остаточные деформации и методы их снижения // 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. – СНЦ РАН. – Самара, 2004. – 112 с.

УДК 617.3 617-089.844

*А.С. Букатый, Д.К. Задорожний, О. Ефименко,
В.Н. Бородецкий, Д.С. Чуриков*

РАЗРАБОТКА БИОМЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЛУЧШЕННОЙ ОСТЕОИНТЕГРАЦИЕЙ

Введение. В области челюстно-лицевой хирургии компьютерная томография (КТ) является основным методом визуализации при опухолевых поражениях челюстно-лицевой области [1]. На основе данных компьютерной томографии, как правило, осуществляется разработка и проектирование имплантатов [2, 3], однако, одним из наиболее важных вопросов является прочность изделия. Челюсти человека способны развивать существенные усилия, в результате чего зачастую наблюдается усталостное разрушение имплантатов и взаимосвязанные с этим осложнения. Целью исследований, представленных в данной работе, является разработка индивидуальных челюстных имплантатов, обеспечивающих улучшенную остеointegrацию и прочность конструкции.

Актуальность исследования. Работы по обеспечению прочности проводились в процессе разработки имплантата для пациента, у которого в результате онкологического заболевания возникло поражение костных тканей нижней челюсти. В ходе хирургического вмешательства был удалён поражённый участок челюсти. В процессе проектирования рассматривалась возможность изготовления изделия из материалов ВТ-6 и РЕЕК. Титановые сплавы находят широкое применение в области проектирова-