



УДК 621.431:621.75:62-843.8:621.787

УВЕЛИЧЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ЖСЗ6ВИ ПУТЕМ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ИХ ХВОСТОВИКОВ МИКРОШАРИКАМИ

И. С. Малашенко, В. А. Ровков, В. В. Куренкова, А. Ф. Белявин,
Д. А. Федотов, В. К. Сычев

Рассмотрена возможность применения дробеструйной упрочняющей обработки поверхности елочного замка монокристаллических лопаток из сплава ЖСЗ6 стальными микрошариками для увеличения сопротивления усталости при циклическом нагружении. Описаны параметры технологического процесса и показана возможность оценки поверхностного деформационного упрочнения внешних слоев металла замка при помощи измерения микротвердости HV . Определен уровень наведенных напряжений в окрестности зуба замка. Дробеструйная обработка позволила повысить сопротивление усталости монокристаллических лопаток минимум на 50 МПа при резонансной частоте, а очаг усталостного разрушения при этом переместился из впадины первого зуба на поверхность пера лопатки.

The feasibility of application of shot-blasting strengthening treatment of surface of a fir-tree locking piece of single-crystal blades of alloy ZhS6 using steel microballs to increase the fatigue resistance at cyclic loading is considered. Parameters of technological process are described and possibility of estimation of surface deformational strengthening of locking piece metal layers using the measurements of microhardness HV is shown. The level of induced stresses in the vicinity of the locking piece teeth was determined. The shot-blasting treatment allowed increasing the fatigue resistance of single-crystal blades at least by 50 MPa at resonance frequency, and the source of fatigue fracture in this case was displaced from the first teeth depression to the surface of a blade airfoil.

Ключевые слова: дробеструйная обработка; микрошарики; лопатка турбины; усталостные испытания; упрочненный слой; микротвердость; циклическая долговечность; разрушение

Введение. Надежность и долговечность деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной степени определяются физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Для повышения сопротивления усталости деталей, подверженных циклическому или вибрационному нагружению, широко используют поверхностное пластическое деформирование (ППД) металлическими или стеклянными шариками диаметром 35...300 мкм [1–4]. Обработка микрошариками обеспечивает упрочнение поверхности практически любых деталей с острыми кромками ($R_a < 0,1$ мм), канавками, проточками лабиринтных уплотнений, изделий с резьбами и т. д. На обрабатываемой поверхности создаются максимальные сжимающие остаточные напряжения, при этом образуется наклепанный слой определенных глубины и степени деформации.

Упрочнение поверхности микрошариками (УМШ) не нарушает геометрии деталей и тормозит развитие процессов усталости, вызванных повреж-

дениями, связанными с механической обработкой в очаге максимальных изгибных напряжений на ранней стадии их эксплуатации.

Назначение режимов дробеструйного упрочнения деталей авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) микрошариками должно определяться в первую очередь в зависимости от формирования микрогеометрии с заданной высотой микронеровностей R_z и оптимального радиуса закругления r дна впадины, остающейся от удара микрошариком.

Согласно работе [2], глубина проникновения пластической деформации прямо пропорциональна диаметру используемых микрошариков и корню квадратному скорости их полета. В наклепанном поверхностном слое возникают осевые и тангенциальные сжимающие напряжения. Вблизи границы этого слоя напряжения резко уменьшаются и переходят в растягивающие, максимум которых располагается на некотором расстоянии от границы наклепанного слоя.

Поверхностное упрочнение микрошариками обеспечивает минимальную пластическую деформацию металла хвостовика лопатки, изменяя эпюру остаточных напряжений по всему сечению хвос-



товика. При УМШ деталей из различных никелевых сплавов структурное состояние металла и содержание углерода определяют кинетику изменения остаточных напряжений по толщине слоя [3]. Обработка микрошариками обеспечивает лучшие показатели сопротивления усталости пера лопатки компрессоров. Так, предел выносливости в этом случае возрастает примерно на 12 % на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ цикл.

В монографии [4] сопоставляются результаты испытаний на усталость лопаток турбин высокого давления (ТВД), замковые соединения которых выполнены различными способами (фрезерованием или глубинным шлифованием). При шлифовании (в отличие от фрезерования) формируется регулярный рельеф с меньшей шероховатостью, но с более выраженными микровпадинами и выступами. Стабилизировать параметры поверхностного слоя замковой части и повысить предел выносливости удается за счет ППД хвостовиков в результате обработки микрошариками.

Процесс ППД микрошариками управляем при обеспечении заданной степени наклепа и уровня деформации. Применяемые на практике методы неразрушающего контроля не дают достоверной информации о глубине наклепанного слоя и степени наклепа [5]. Вместе с тем метод измерения микротвердости поверхностных слоев замка дает удовлетворительные результаты относительно характера пластической деформации металла хвостовика [6]. Для прогнозирования поведения деталей в рабочих условиях необходимо знать свойства этого слоя с целью оптимизации поверхностного деформационного упрочнения внешних слоев металла замков и оценки циклической долговечности лопаток.

В задачу настоящего исследования входила обработка технологического процесса ППД поверхности фрагментов монокристаллических лопаток из сплава ЖС36ВИ путем их обработки струей микрошариков для повышения предела выносливости металла елочного замка, увеличения долговечности и надежности эксплуатации детали в целом.

Материалы исследования. При дробеструйном упрочнении елочного замка лопаток турбин не требуется достижения минимальной шероховатости. Высота микронеровностей R_z допускается, согласно работе [1], не более 2,5 мкм. Поскольку конструкция елочного замка характеризуется повышенной жесткостью, применяют интенсивные режимы дробеструйной обработки.

Предварительно дробеструйную пневмодинамическую установку с соплами различного сечения тарировали для определения интенсивности обработки поверхности микрошариками путем определения уровня прогиба пластин Алмена* при фиксированном времени обработки 3 мин. Когда прогиб плоского образца в результате ППД начинает изменяться слабо, в зависимости от времени обработки,

наступает момент «насыщения», т. е. кристаллическая решетка металла перестает воспринимать подводимую кинетическую энергию микрошариков. Этот период (2...3 мин) интенсивной обработки указывает на необходимость прекращения процесса УМШ. Давление струи микрошариков может изменяться в 1,5...2,0 раза и определяется опытным путем.

Главными параметрами процесса упрочнения лопаток являются продолжительность наклепа единицы площади детали при ее вращении в потоке микрошариков, размер последних (диаметр), скорость полета, определяемая диаметром сопла, откуда истекают микрошарики, и давлением воздуха на входе в установку. От времени наклепа единицы площади детали зависит стабильность и сплошность («покровность») обработки, что обеспечивает равномерность пластической деформации анализируемой поверхности.

Для обработки поверхности зубьев хвостовика лопатки устанавливали в специальную оправку, вращаемую подающим штоком. Особенность расположения лопатки в оснастке заключалась в том, что при ее вращении в потоке микрошариков угол наклона поверхности стенок зубьев к потоку рабочего тела был максимально перпендикулярным к основному направлению струи дробы (рис. 1).

Частота вращения пластины для контроля уровня наведенных напряжений потоком микрошариков, как и фрагментов хвостовика, составляла 12 об/мин. Использовали микрошарики французского производства марки WS070 (рис. 1, б). Ситовый анализ показал, что 80 % микрошариков имели диаметр 180 мкм.

Приспособление для измерения интенсивности ППД (глубины прогиба образца-свидетеля) в соответствии с требованиями стандарта SAE J422 имело базу 31,75 мм. В качестве контрольных образцов использовали пластины Алмена (тип «А» согласно SAE J422).

Выбор режима обработки елочного замка заключался в назначении условий (параметров) истечения струи микрошариков из рабочего сопла, обеспечивающей необходимое упрочнение поверхностных слоев замка детали, которое должно гарантировать максимальное сопротивление усталости металла хвостовика (прикорневой части монокристаллической лопатки) при сохранении геометрических параметров и точности изготовления деталей.

Основным методом структурных исследований состояния приповерхностных слоев металла зубьев лопаток и изломов испытанных лопаток служили растровая электронная микроскопия и микроанализ при помощи сканирующего микроскопа CamScan-4 с энергодисперсионным анализатором ENERGY 200 и программным обеспечением INCA.

Микротвердость упрочненного слоя хвостовиков после различных режимов обработки исследо-

* Паспорт на пластины TEST STIPS «А» Metal Improvement Company, US, N.J. 07072.

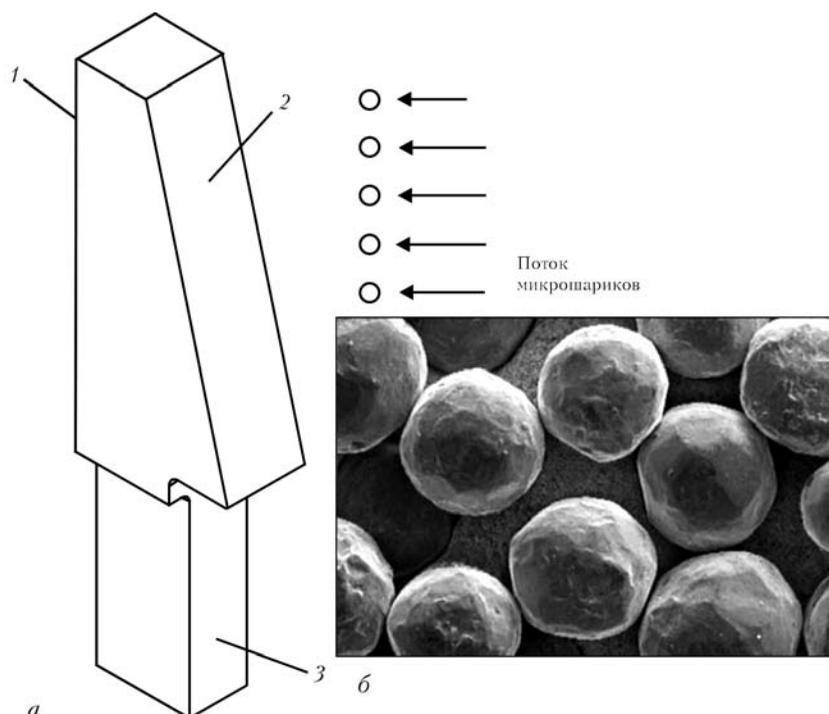


Рис. 1. Фрагмент заготовки хвостовика рабочей лопатки ТВД (без нарезания зуба), на котором обрабатывали режимы дробеструйного упрочнения поверхности металла елочного замка микрошариками (а) и внешний вид стальных микрошариков, используемых в установке дробеструйного упрочнения поверхности (б): 1 – ребро; 2 – пирамида; 3 – ножка

вали на приборе «Micro-Duomat 4000E» при нагрузке 10 г.

Испытания на циклическую долговечность исходных и обработанных (после УМШ) лопаток производили на электродинамической установке УВЭ-1-004, принципиальная схема которой описана в работе [7].

Экспериментальная часть. Хвостовики монокристаллических рабочих лопаток из сплава ЖС36ВИ подвергали ППД непосредственно после установки нового сопла в рабочую камеру и его тестирования. На первом этапе исследований использовали заготовки лопаток без нарезанного елочного замка и после различных штатных режимов термической обработки сплава ЖС36 в вакууме:

гомогенизации;

высокотемпературного старения при 1030 °С (4 ч);

старения при 1030 и 870 °С (32 ч).

Образцы из замковой части заготовки обрабатывали на соплах различного диаметра (рис. 1). Максимальный прогиб (140 мкм) получен при использовании сопла диаметром 7 мм. Увеличение

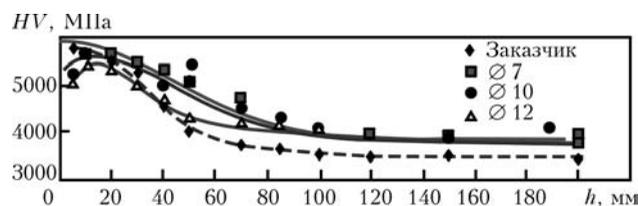


Рис. 2. Распределение микротвердости HV ($P = 10$ г) по глубине металла в объеме фрагментов заготовки хвостовика рабочей лопатки (сплав ЖС36ВИ после гомогенизации), подвергнутых дробеструйной обработке в течение 6 мин на соплах различного диаметра и на лопатке-этalone (после УМШ у заказчика); h – расстояние от поверхности зуба хвостовика

диаметра сопла снижало скорость истечения потока микрошариков. Высота прогиба контрольной пластины снизилась от 140 до 98 и далее до 94 мкм (для сопла диаметром 13 мм). Таким образом, наиболее высокая интенсивность насыщения поверхности при дробеструйной обработке отмечена в интервале диаметров расходных сечений сопел 7... 10 мм.

На рис. 2 приведены результаты исследования распределения микротвердости по глубине после обработки фрагментов хвостовиков потоком микрошариков на различных режимах ППД с использованием разных сопел.

Средняя микротвердость материала лопатки в состоянии после гомогенизации и старения составляла HV 3500, а упрочненного слоя – HV 5500... ..6000 МПа. Как правило, максимальное значение микротвердости получали непосредственно на поверхности или на расстоянии не более 10... 15 мкм от поверхности.

Глубина распространения повышенной микротвердости совпадает с глубиной распространения наведенных сжимающих напряжений. С уменьшением диаметра сопла и увеличением скорости истечения микрошариков из системы микротвердость приповерхностного слоя, т. е. степень наклепа по глубине, и глубина обработанного слоя возрастают (рис. 3).

Интенсивность дробеструйной обработки угловой области фрагмента хвостовика оказалась существенно выше таковой плоской поверхности фрагмента. Глубина упрочнения плоской поверхности образца в результате дробеструйной обработки достигала 100 мкм (HV 4000 МПа), в угловой области фрагмента, моделирующей зуб, упрочнение нивели-

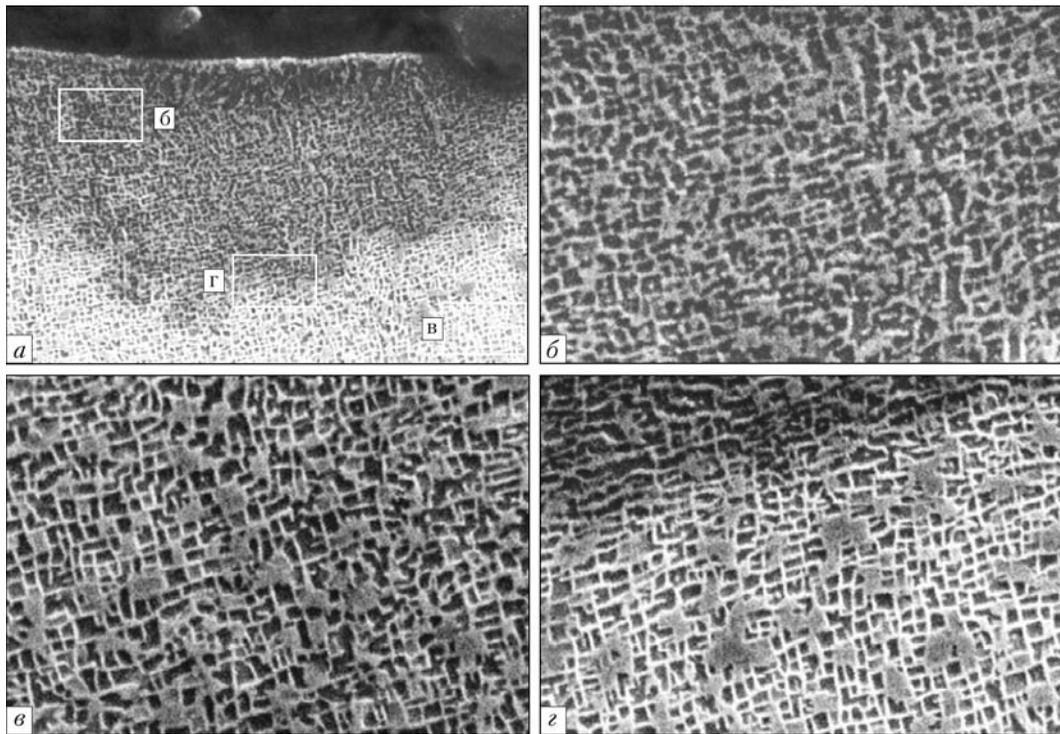


Рис. 3. Микроструктура зоны пластической деформации (после УМШ в течение 6 мин на сопле среднего диаметра) у поверхности 1-го зуба лопатки, прошедшей полную термообработку: *a* – общий вид поверхностного слоя металла; *b* – область пластической деформации; *c* – упрочняющая γ -фаза в металле зуба; *d* – то же, на границе зоны видимой ППД и нижних слоев сплава ЖС36; *a* – $\times 120$; *b-d* – $\times 5000$

ровалось лишь на глубине 200 мкм, при этом отмечено пропорциональное уменьшение HV с увеличением расстояния h от поверхности.

Максимум упрочнения фрагментов был примерно одинаковым на плоской стороне и на ребре фрагмента хвостовика – 5800 МПа в случае минимального диаметра сопла при времени обработки 6 мин. Эти данные показали, что в одних условиях ППД уровни упрочнения во впадине зуба и на его вершине различаются несущественно.

Максимальный уровень упрочнения фрагмента в случае обработки на соплах диаметром 12... 13 мм не превышал 5500 МПа на глубине около 10 мкм от поверхности. Следовательно, ППД хвостовика можно проводить на больших диаметрах сопла и при большем времени обработки или, что экономически выгоднее, на меньшем диаметре сопла и более коротком времени упрочнения.

При дробеструйной обработке с использованием сопел большего диаметра монотонное упрочнение происходило в поверхностном слое на глубину до 100 мкм (а не 200 мкм, как в случае сопла минимального диаметра). Различие в эффекте упрочнения ребра и плоской поверхности фрагмента не зафиксировано глубже 100 мкм. Следовательно, сопла диаметром 12... 13 мм обеспечивают мягкий однородный режим поверхностного пластического формирования.

Уровень наведенных в результате УМШ напряжений в хвостовиках реальных лопаток контролировали измерением микротвердости приповерхностных слоев елочного замка на глубину до 250 мкм, т. е. до металла, не претерпевавшего наклепа.

При назначении режимов ППД (продолжительности их обработки) реальных деталей в дробеструйной установке учитывали данные прогиба контрольных пластин, устанавливаемых стационарно. Это время (до 30... 60 с) увеличивается в π раз в случае вращения объекта в потоке микрошариков. При уменьшении диаметра микрошариков диаметр сопла следует также уменьшать для обеспечения нужной скорости полета рабочего тела с целью увеличения кинетической энергии отдельных шариков.

Увеличение времени обработки в два раза не способствовало дополнительному упрочнению металла замка. Рост продолжительности обработки замка микрошариками выше порога насыщения не вызвал снижения сопротивления усталости [1]. С повышением скорости рабочей струи микрошариков, связанной с уменьшением диаметра сопла, растет интенсивность поверхностной деформации и увеличивается глубина распространения ППД.

При постоянной скорости полета шариков сжимающие остаточные напряжения на поверхности изменяются несущественно с ростом диаметра микрошариков [1]. Поэтому некоторое изменение фракционного состава дробы в процессе длительной работы оборудования особого влияния на финальные результаты технологического этапа ППД лопаток не оказали.

Микротвердость HV эталонной лопатки в окрестности зуба замка, прошедшей все стадии процесса обработки, включая ППД замка у заказчика, составляла 6000 МПа. Получено постепенное снижение упрочнения по мере углубления в тело замка на расстояние 110... 120 мкм, где микротвердость



достигала 3700... 3750 МПа. Это и есть микротвердость монокристаллического сплава ЖС36 после полного цикла термообработки.

Характер изменения микротвердости приповерхностного слоя в участках впадины или стенки зуба одинаков, абсолютное значение HV по стенкам зуба было чуть выше, чем во впадине.

При обработке другой реальной лопатки после полного цикла термообработки на сопле среднего диаметра обнаружена некоторая неоднородность в результатах измерения микротвердости в области 1-го зуба и примыкающих впадин. Время ППД составляло 3 мин. Вершина зуба претерпела наиболее интенсивное упрочнение (на глубину до 80 мкм). При среднем значении микротвердости внутренних объемов замка 3800 МПа упрочнение поверхностных слоев хвостовика в окрестности 1-го зуба соответствовало значению микротвердости (5500±250) МПа.

Минимальное упрочнение (не более 5000 МПа) получено на стенках 1-го зуба на глубину до 50 мкм. Этот результат явился следствием отклонения угла падения потока микрошариков от нормального, по отношению к поверхности стенок, формирующих зуб замка. Упрочнение поверхности впадин 1- и 2-го зубов было одинаковым и промежуточным между упрочнением вершины зуба и его стенок. Изменение времени обработки хвостовика (3 или 6 мин) существенного влияния на характер упрочнения металла не оказывало.

Отработка технологии ППД хвостовиков реальных рабочих лопаток. При дробеструйной обработке хвостовиков реальных рабочих лопаток турбины требовалось получить равномерную пластическую деформацию поверхностных слоев елочного замка (в области впадины 1-го зуба, непосредственно 1-го зуба и впадины 2-го зуба). Для этого выполнили предварительную оценку качества ППД при различных условиях размещения лопатки в потоке микрошариков. При установке лопаток в пневмодробеструйную установку поток шариков покрывал хвостовую часть детали с удовлетворительной однородностью обработки елочного замка.

Наиболее высокой интенсивности обработки поверхности зуба микрошариками достигали на сопле диаметром 7 мм. В этом случае скорость потока микрошариков и вкладываемая в поверхность елочного замка кинетическая энергия рабочего тела были наиболее высокими.

На оборудовании заказчика получен незначительный градиент упрочнения поверхности на толщину не более 70 мкм. Микротвердость HV глубинных слоев металла монокристаллической лопатки из сплава ЖС36ВИ после всех режимов термообработки составила 3500, а внешнего слоя (после УМШ) достигала 5800 МПа. Упрочнение металла базовой лопатки, оцениваемое по микротвердости приповерхностных слоев, равной 5750... 5250 МПа, монотонно убывало на глубину 70... 60 мкм.

На основе результатов модельных экспериментов по упрочнению елочного замка выбран двухэтапный

режим обработки хвостовиков лопаток по 2 мин в двух различных позициях с использованием сопла диаметром 7 мм, которое позволило получить максимальную скорость истечения потока шариков, благодаря чему достигнута удовлетворительная интенсивность упрочнения на глубину до 100... 120 мкм. Остаточные сжимающие напряжения снижались от поверхности во внутренние объемы детали. При неизменном поверхностном упрочнении глубина распространения наведенных напряжений в металл на 35... 40 мкм превышала таковую базовой детали.

Сопло устанавливали таким образом, чтобы угол падения потока микрошариков по отношению к боковым поверхностям, формирующим зуб, составлял 70°. В этом случае упрочнение (приращение твердости) основного металла на глубине 20 мкм от поверхности вдоль обвода зуба, стенок и впадины было примерно одинаковым.

Эффективность упрочнения хвостовика лопаток, обработанных по описанной схеме, заметно выше, чем у хвостовика базовой лопатки, обработанной заказчиком. Пик микротвердости у поверхности достигал 6200 МПа. Градиент упрочнения распространялся на глубину до 120 мкм, монотонно снижаясь через всю толщину обработанного поверхностного слоя. Уровень микротвердости сплава составлял стабильно (3500±100) МПа.

На рис. 3 показана тонкая структура приповерхностных слоев металла фрагмента хвостовика заготовки после гомогенизации и реализации процесса УМШ. Отмечена незначительная пластическая деформация частиц γ' -фазы в матрице непосредственно у поверхности замка. Во внешнем поверхностном слое какие-либо инородные частицы отсутствовали.

Результаты испытаний на усталость монокристаллических лопаток. Сравнительные испытания на усталость лопаток 1-й ступени турбины проводили на электродинамическом вибраторе УВЭ-1-004 при температуре 20 °С. Нагружение лопатки осуществляли силами инерции при резонансных изгибных колебаниях (основной формы). Для испытания подготовили две партии лопаток:

некондиционные без дробеструйной обработки хвостовика микрошариками (после двухстадийного старения);

после старения и дробеструйного упрочнения хвостовика по выбранному режиму (сопло диаметром 7 мм, в двух позициях, по 2 мин обработки в каждой позиции).

Сравнительные испытания на усталость лопаток проводили согласно ОСТУ 100870-77 на базе $2 \cdot 10^7$ цикл нагружения.

Напряжения на поверхности галтельного перехода у 1-го зуба хвостовика рассчитывали по результатам статической тарировки ($\sigma_{\max} = 37,6$ МПа). Динамическую тарировку проводили до уровня переменных напряжений 50 МПа по тензорезистору, расположенному на поверхности спинки у корневой части пера, с помощью камертонного устройства



Рис. 4. Места зарождения усталостного разрушения в пяти монокристаллических рабочих лопатках турбины двигателя, не прошедших УМШ после циклических испытаний при температуре 20 °С

(тензостанция УТ-4 г). В качестве критерия разрушения испытываемых лопаток принимали снижение резонансной частоты изгибных колебаний на 3... 5 Гц.

Очаги возникновения усталостного разрушения лопаток, не прошедших дробеструйную обработку елочного замка и после ППД хвостовика, показаны на рис. 4.

При больших значениях долговечности ($N_f = 2 \cdot 10^7$ цикл) и относительно низком уровне амплитудного напряжения σ_a обработка хвостовиков лопаток микрошариками на пневмодинамической установке обеспечила повышение предела усталости металла на 35... 40 МПа (от 50 до 90 МПа). По сравнению с лопаткой, прошедшей УМШ хвостовика у заказчика, сопротивление многоциклового усталости лопаток после выполненной авторами дробеструйной обработки возросло на 15 МПа на базе $2 \cdot 10^8$ цикл (рис. 5).

Использованные технологические приемы ППД хвостовиков рабочих лопаток путем их дробеструйной обработки позволили повысить сопротивление усталости лопаток и подавить возникновение очагов усталостного разрушения в окрестности впадины 1-го зуба (рис. 6).

Размер использованных при наклепе микрошариков, время и интенсивность обработки позволили определить требуемую глубину (до 150 мкм) распространения сжимающих напряжений в поверхностных слоях металла хвостовиков рабочих лопаток из сплава ЖС36ВИ.

Особенности разрушения рабочих лопаток после дробеструйной обработки микрошариками. Вы-

сокая чувствительность монокристаллов к концентраторам напряжений объясняется в работе [8] отсутствием границ зерен, которые являются препятствием на пути распространения магистральной трещины усталости. В поликристаллических сплавах трещина меняет направление своего распространения каждый раз, когда пересекает границы зерен. Это приводит к увеличению длины траектории трещины усталости.

В монокристаллах с надрезом трещина усталости практически беспрепятственно распространяется через весь образец. Поэтому монокристаллическая лопатка характеризуется высокой чувствительностью к наличию концентраторов напряжений, например дефектов (рис. 7). Это обнаружено при циклических испытаниях на усталость рабочих лопаток, когда очаг разрушения у конкретной детали возник у литейного микродефекта на заднем торце замка.

Согласно работе [9], существует три кристаллографические зоны усталостного разрушения на поверхности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов (ЖС) ЖС32, ЖС6Ф: зарождения трещины (1), некристаллографическая зона распространения трещины (2) и зона долома (3).

Зона 1 соответствует стадии образования стабильных полос скольжения по плоскостям, вдоль которых и происходит рост трещины (рис. 7, б). Зона усталостного излома имеет гладкий скользящий вид и занимает до 80 % поверхности.

Распространение трещины усталости происходит по плоскости октаэдра {111} в направлении [011], что соответствует обычной системе скольже-

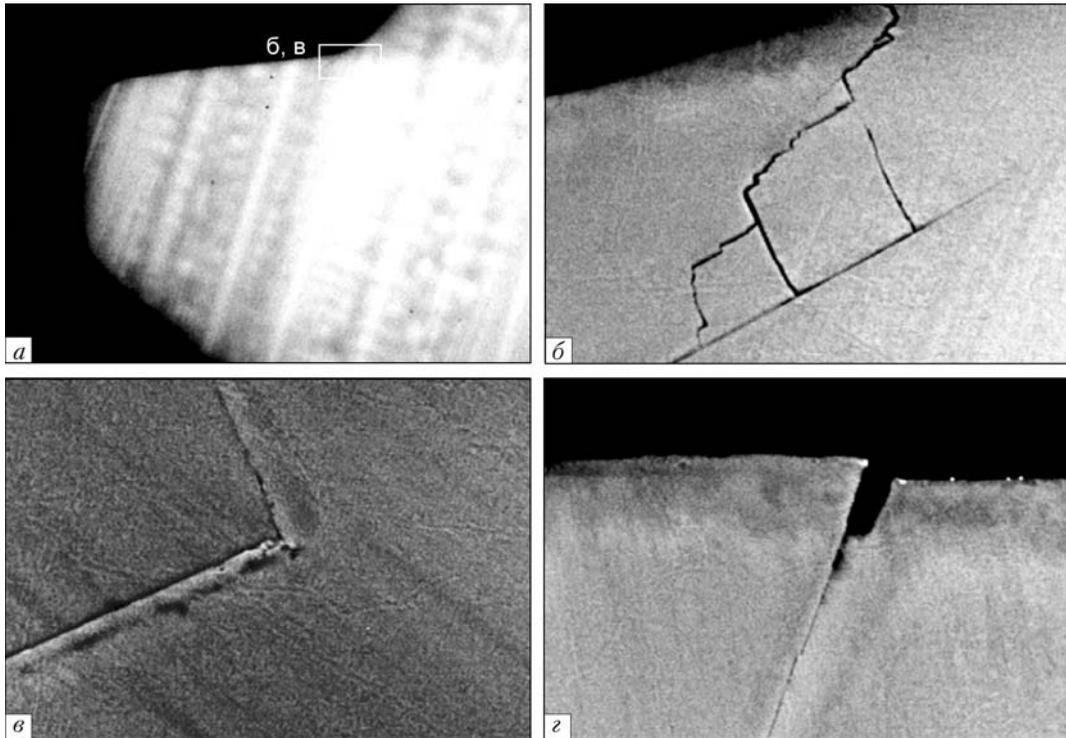


Рис. 5. Сетка усталостных микротрещин на поверхности заднего торца (кармана) в месте впадины 1-го зуба хвостовика лопатки, не обработанной микрошариками, без ППД ($\sigma_a = 60$ МПа, $N_f = 9,1 \cdot 10^6$ цикл): а — дендритная структура монокристаллической лопатки; б, в — сетка усталостных трещин, возникшая на поверхности ребра заднего торца со стороны спинки; з — устье трещины; а — $\times 32$; б-з — $\times 1000$

ния в монокристаллических никелевых ЖС [9]. На плоскости скола октаэдра видны «ручейстый» узор и полосы, указывающие направление [011] распространения трещины (рис. 7).

Ручейстый узор — это микродоломы, возникающие при распространении трещины усталости по параллельным плоскостям, лежащим на разных уровнях. Очаги усталостного разрушения возникают в определенных с кристаллографической точки зрения местах залегания карбидных частиц или микропор на поверхности детали или под поверхностью, где действуют максимальные напряжения (рис. 7, в).

Согласно работе [9], для аксиальной ориентации [011] и [111] в образцах из сплавов ЖС32 и ЖС6Ф

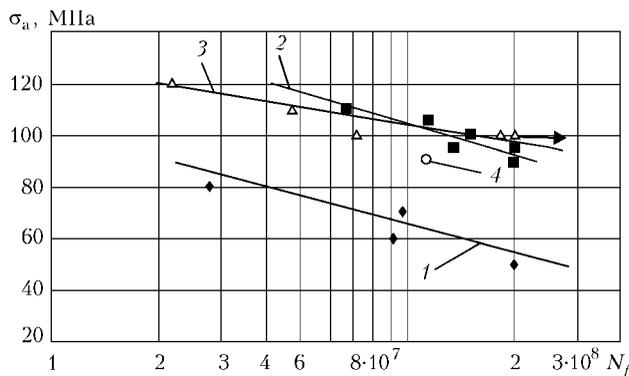


Рис. 6. Усталостные характеристики рабочих монокристаллических лопаток (сплав ЖС36ВИ) после двухстадийной гомогенизации (1), дробеструйного упрочнения хвостовика лопаток (2), дробеструйной обработки последовательно хвостовика и пера лопаток (3), дробеструйной обработки у заказчика (4)

зафиксирована ориентационная зависимость возникновения очагов усталостного разрушения.

Из пятнадцати экспериментальных лопаток, хвостовики которых подвергались дробеструйному упрочнению микрошариками, отобраны пять лопаток, у которых дополнительно обработали микрошариками трактовую поверхность (перо) с целью выявления очагов разрушения при циклических испытаниях. После указанной обработки уровень введенных напряжений на поверхности рабочих лопаток был одинаковым.

Перо лопаток, включая поверхность бандажной полки, обработали в стандартной сертифицированной оснастке на сопле диаметром 7 мм в одной позиции в течение 2 мин при скорости вращения лопатки 12 об/мин относительно оси Z. Параметры процесса ППД лопаток оставались неизменными.

Уровень остаточных напряжений первого рода в лопатке из сплава ЖС36ВИ оценивали путем определения параметров решетки исходного (необработанного) и упрочненного микрошариками плоских образцов, вырезанных из хвостовой части рабочих лопаток [10].

Съемку образцов проводили в дискретном режиме на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 (излучение $Cu_{k\alpha}$, шаг сканирования $0,03^\circ$, экспозиция в каждой точке 4 с, интервал углов $40...155^\circ$). Обработку дифракционных данных осуществляли методом полнопрофильного анализа (погрешность в определении положения центра тяжести пика равнялась $\pm(0,001...0,005)^\circ$). Установлено, что параметр решетки a_0 ненапряженного образца составлял $0,35876$, а напряженного — $0,35934$ нм.

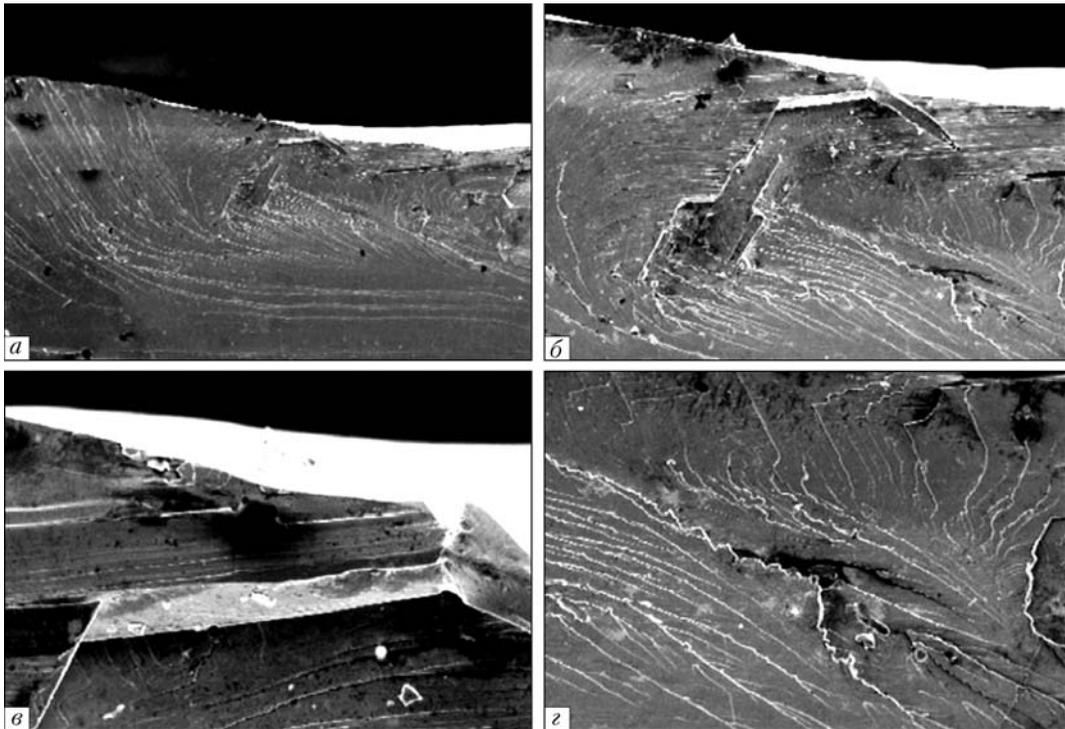


Рис. 7. Усталостный излом (поверхность разрушения), возникший в теле ребра торца хвостовика, со стороны корыта лопатки ($\sigma_a = 110$ МПа, $N_f = 6,8 \cdot 10^6$ цикл; амплитуда колебаний 320 мкм): *a* – общий вид излома; *б* – кристаллографическая зона; *в* – очаг разрушения; *з* – зона распространения трещины; *a* – $\times 40$; *б* – $\times 100$; *в* – $\times 400$; *з* – $\times 200$

На основании расчета дифрактограмм исходного и упрочненного образцов получено, что после УМШ обработки по оптимизированному режиму на поверхности плоского образца сплава ЖС36ВИ возникали сжимающие напряжения на уровне 750 МПа. Примерно такой же равномерный уровень сжимающих напряжения был наведен на профильной поверхности во впадинах и на контактных площадках зубьев елочного замка рабочей лопатки.

Эпюры распределения остаточных напряжений по первой впадине елочного замка рабочей лопатки из сплава ЖС36ВИ после обработки микрошариками приведены на рис. 8. После обработки микрошариками заказчиком на поверхности пера лопатки возникли растягивающие остаточные напряжения (200 МПа) с глубиной распространения до 20...30 мкм, а в более глубоких слоях, расположенных от поверхности на расстоянии 30...100 мкм, – остаточные напряжения сжатия.

После обработки образцов микрошариками по режимам, рассмотренным в настоящей работе, на поверхности пера лопатки имели место остаточные напряжения сжатия с максимальным значением 520...590 МПа и глубиной распространения 40...80 мкм.

Результаты циклических испытаний, выполненные в Институте проблем прочности НАНУ, обобщены на рис. 6, 9. В качестве критерия начала усталостного разрушения испытываемых лопаток принимали снижение резонансной частоты (2340...2365 Гц) изгибных испытаний на 3...5 Гц.

При значении напряжения $\sigma_a = 100$ МПа ни в одной из испытанных лопаток разрушения на базе $2 \cdot 10^7$ цикл у впадины 1-го зуба и по ребрам заднего

торца не зафиксировано. В одной из лопаток разрушение произошло при 100 МПа в наиболее напряженной зоне на спинке в области, где клеился датчик. В другой лопатке трещина возникла рядом с 6-м перфорационным отверстием (считая от бандажной полки). В случае $\sigma_a = 120$ МПа разрушение еще одной лопатки произошло на выходной кромке со стороны корыта. Лопатка выдержала полную базу испытаний $2 \cdot 10^7$ цикл при напряжении $\sigma_a = 100$ МПа.

Полученные результаты свидетельствуют об определенных недостатках в технологии литья монокристаллических лопаток, поскольку в зависимости от изделия очаг разрушения перемещался в различные точки поверхности [11]. Негативных конструктивных особенностей в деталях в результате

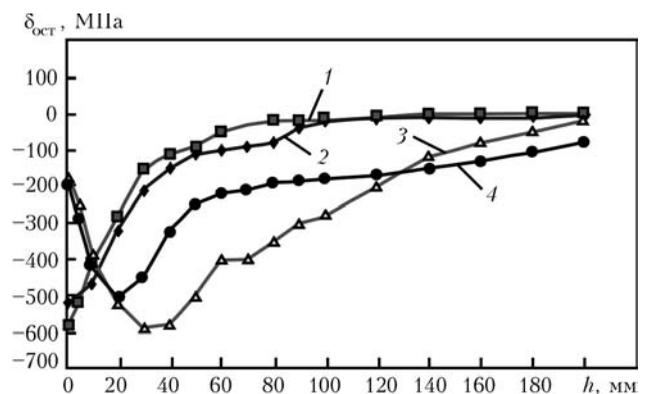


Рис. 8. Эпюры распределения остаточных напряжений на образцах, взятых со стороны корыта и спинки рабочих лопаток из сплава ЖС36ВИ, после обработки микрошариками у заказчика и авторами работы: 1 – корыто; 2 – спинка; 3 – спинка (заказчик); 4 – корыто (заказчик)

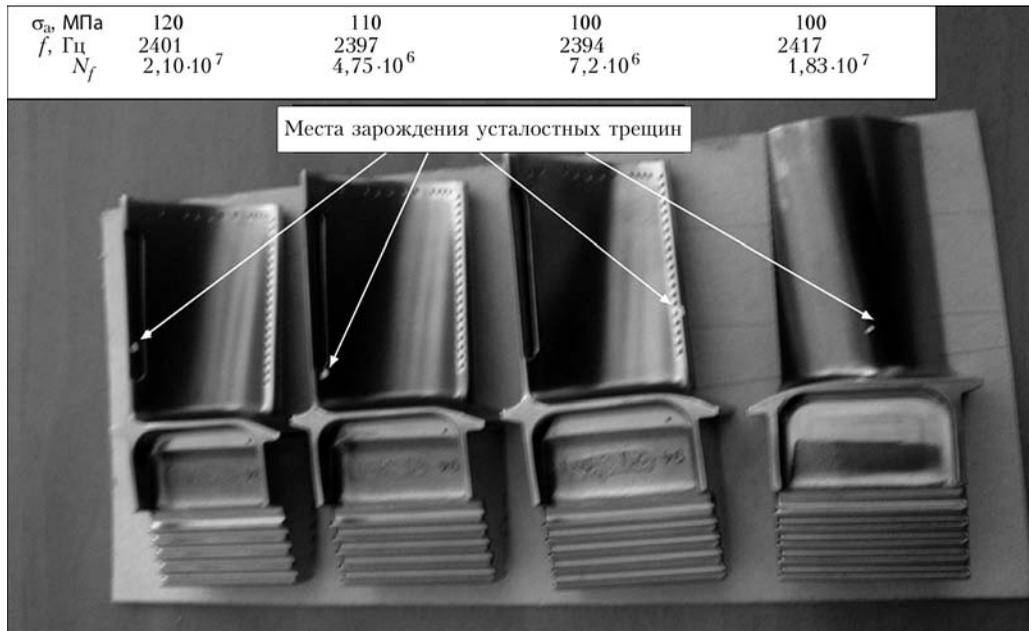


Рис. 9. Места зарождения усталостного разрушения в четырех монокристаллических рабочих лопатках турбины двигателя, прошедших раздельно ППД хвостовика и пера, после циклических испытаний при температуре 20 °С

испытаний не выявлено. Можно утверждать, что рабочие монокристаллические лопатки турбины после ППД елочного замка на пневмодинамической установке имеют предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$, цикл знакопеременного нагружения 100... 5 МПа, что в 2 раза выше, чем у исходных лопаток, не подвергавшихся УМШ.

Выводы

1. Разработана опытно-промышленная технология поверхностного пластического деформирования хвостовиков рабочих лопаток из сплава ЖС36ВИ с целью увеличения сопротивления усталости (циклической долговечности).

2. Процесс ППД заключается в дробеструйном упрочнении елочного замка потоком стальных микрошариков, который эмитируется из сопла диаметром 7 мм воздушным потоком под давлением на расстоянии 300... 320 мм от среза сопла. Скорость вращения лопатки в потоке микрошариков составляла 12 об/мин. Детали обрабатывали потоком микрошариков в двух позициях.

3. Упрочнение приповерхностных слоев металла елочного замка исследовали путем измерения микротвердости *HV* при нагрузке 10 г в окрестности вершины, впадины и стенок зубьев. После дробеструйной обработки хвостовиков микротвердость базового сплава ЖС36ВИ равнялась 3500, а упрочненного приповерхностного слоя — 5800... 6000 МПа. Глубина упрочнения металла хвостовика (наведение остаточных напряжений сжатия) составляла примерно 120... 160 мкм при использовании сопел различного диаметра в процессе УМШ.

4. Упрочняющая обработка хвостовиков лопаток микрошариками при долговечности $N_f = 2 \cdot 10^7$ цикл на пневмодинамической установке позволила повысить предел усталости металла монокристаллических

лопаток на 35... 40 МПа (от 50 до 95 МПа). Выбранный режим УМШ предотвращает разрушение хвостовика лопатки по впадине 1-го зуба.

5. С помощью дифрактометрического анализа установлено, что в результате УМШ на поверхности хвостовика лопатки из монокристаллического сплава ЖС36ВИ возникают сжимающие напряжения на уровне 590...750 МПа.

- Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. Н., Волков В. Н. Технологические методы повышения надежности деталей машин. Справочник. — М.: Машиностроение, 1993. — 304 с.
- Саверин М. М. Дробеструйный наклеп. — М.: Машгиз, 1955. — 312 с.
- Рыбаков Г. М., Пудков С. И., Чернышев В. В. Оптимизация режимов дробеструйной обработки деталей ГТД по критериям выносливости // Авиац. пром-сть. — 1988. — № 4. — С. 15-16.
- Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. — М.: Машиностроение, 1993. — 240 с.
- Кузнецов Н. Д., Плоскин Ю. В., Волков В. И. Исследование глубины наклепанного слоя на поверхности детали ГТД из сплавов ХН45МВАТЮБР и ВТ9 // Авиац. пром-сть // 1989. — № 9. — С. 17-19.
- Куренкова В. В. Особенности микроструктуры поверхности елочного замка монокристаллических рабочих лопаток из сплава ЖС36ВИ // Современ. электрометаллургия. — 2010. — С. 38-46.
- А. с. 105806 СССР, МПК В 23 К 1/19. Вибростенд для усталостных испытаний объектов // В. А. Ровков, Н. И. Жабко, Ю. А. Коломиец. — Оpubл. 30.11.1983; Бюл. № 44.
- Верин Д. Дж. Микроструктура и свойства жаропрочных сплавов // Жаропрочные сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — С. 217-241.
- Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов // Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. — М.: Машиностроение, 1997. — 336 с.
- Русakov А. А. Рентгенография металлов. — М.: Атомиздат, 1967. — 482 с.
- Богуслав В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. Финишные технологии обработки деталей ГТД // Вестник двигателестроения. — 2009. — С. 71-75.

ИЦ «Пратт и Уитни Патон», г. Киев
 Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
 Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко
 НАН Украины, Киев
 З-д «Авиадвигатель», г. Пермь, РФ
 Поступила в редакцию 08.07.2011