В процессе эксплуатации лопатки паровых турбин подвергаются воздействию разрушающих факторов, вызывающих капельно-ударную эрозию (рис. 1), приводящую к выходу их из строя [1, 2]. Замена поврежденных лопаток паровых турбин является трудоемким и дорогостоящим процессом, т. к. требует снятия их с ротора, приобретения новых лопаток, установки их на ротор и пр. [3, 4]. Эрозионному износу подвергаются рабочие лопатки последних ступеней ЦНД, длина пера которой составляет 940 – 1050 мм, а ее стоимость – 0,5 млн р. Поэтому решение проблемы продления ресурса новых или восстановленных лопаток является весьма актуальной задачей, которая может быть решена, в частности, созданием эрозионно стойких покрытий. В связи с этим, настоящая статья посвящена разработке и исследованию новой технологии защитно-упрочняющей обработки лопаток паровых турбин, позволяющих повысить их эрозионную стойкость.

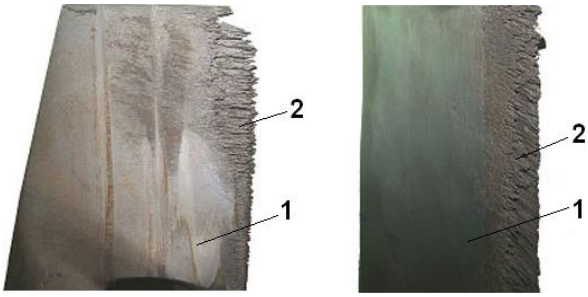

Рис. 1. Эрозионный износ рабочих лопаток паровой турбины: 1 – перо лопатки; 2 – зона эрозионного износа

Существующие технологии упрочняющей обработки лопаток паровой турбины сводятся либо к приварке или припайке стеллитовых пластин к кромке пера лопатки, в зону наибольшей эрозии [5], либо при восстановлении лопатки к удалению поврежденного участка кромки, многослойной наплавке восстанавливаемого участка кромки, термической и механической обработке и приварке стеллитовых пластин [6, 7]. Однако использование стеллитовых пластин усложняет технологию изготовления или ремонта лопаток, а также приводит к снижению их усталостной прочности.

В этой связи, на предприятии ООО «Турбинаспецсервис» разработана и внедрена технология формирования эрозионно стойкой поверхности на лопатках паровых турбин из легированной стали. Варианты технологии были отработаны для упрочнения как новых, так и восстанавливаемых после эксплуатации лопаток [8]. Отличие технологий защитно-упрочняющей обработки новых и восстанавливаемых лопаток состоит лишь в необходимости удаления дефектной части материала изношенных лопаток и восстановлении их геометрии. Процесс формирования эрозионно стойкого слоя на кромках новых и восстановленных лопаток практически не отличался.

Разработанная технология для варианта восстановления с последующей защитно-упрочняющей обработкой, на примере лопатки паровой турбины К-300-240 из стали 15Х11МФ, заключается в следующем [8].

Удаление дефектного материала и восстановление изношенного участка лопатки методами наплавки (рис. 2), с последующей механической обработкой лопатки (рис. 3), обеспечивающей восстановление ее исходной геометрии. В качестве наплавляемого материала при восстановлении лопатки использовался материал Nistelle (Eu TroLoy 16221.04 + ВПр-11-40Н).

Рис. 2. Наплавленный участок лопатки паровой турбины: 1 – перо лопатки; 2 – наплавленный участок лопатки

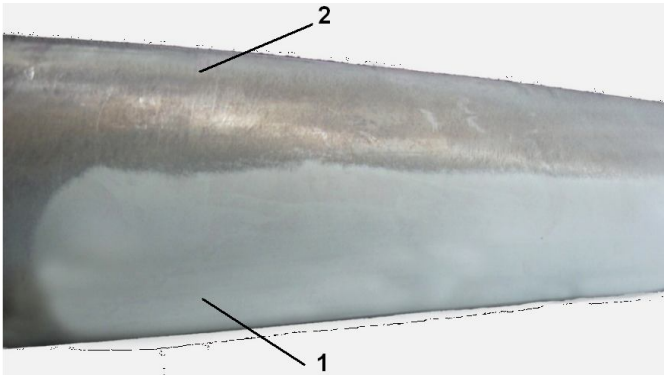

Рис. 3. Рабочая лопатка после механической обработки: 1 – перо лопатки; 2 – восстановленный участок лопатки

В результате проведенных экспериментальных исследований по подбору наплавляемого материала и режимов его наплавки было установлено, что введение в состав Nistelle некоторого количества припоя ВПр-11-40Н стабилизирует процесс наплавки и уменьшает количество дефектов в наплавленном материале (рис. 4).

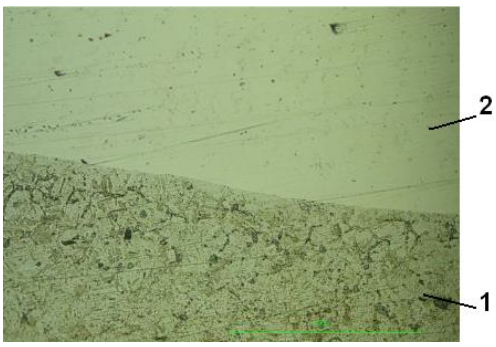

Рис. 4. Структура материала наплавленной зоны лопатки: 1 – основной материал лопатки; 2 – наплавленный материал

После восстановления исходных размеров лопатки производят защитно-упрочняющую обработку пера. При этом области лопатки, подверженные капельно-ударной эрозии, защищают путем формирования на кромке пера лопатки дискретного слоя эрозионно стойкого материала (рис. 5).

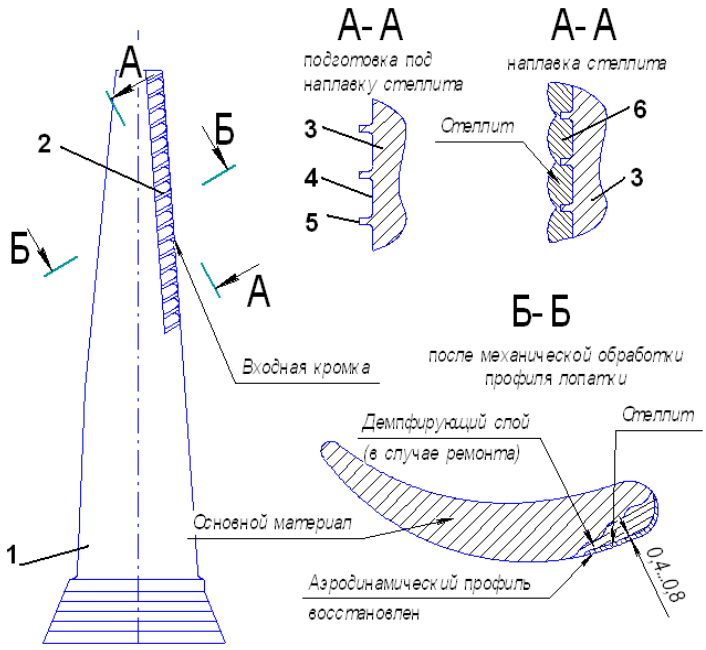

Рис. 5. Схема формирования дискретного эрозионно стойкого покрытия на кромке пера лопатки: 1 – лопатка; 2 – зона лопатки под наплавку стеллита; 3 – основной материал лопатки; 4 – канавки (карманы) под наплавку; 5 – перегородки между канавками; 6 – наплавленный материал

Для наплавки дискретного слоя эрозионно-стойкого материала на входной кромке пера лопатки формируют канавки (рис. 5 и 6). Канавки на кромке под наплавку могут быть изготовлены как методом механической обработки (рис. 6), так и методами размерной электроэрозионной или электрохимической обработки.

После наплавки Stellite на входную кромку на фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ проводится механическая обработка в размер, при этом сохраняется аэродинамический профиль лопатки (рис. 7).

Структура покрытия равномерная, поры и дефекты в наплавленной зоне покрытия не наблюдаются (рис. 8).

Исследование микротвердости образцов с наплавленными слоями показало, что микротвердость слоя Stellite составляет HV = 470 кгс/мм^2, слоя Nistelle HV = 380 кгс/мм^2, а основного материала – стали 15Х11МФ HV = 250…230 кгс/мм^2 (рис. 9).

Рис. 6. Канавки под наплавку на входной кромке пера лопатки: 1 – перо лопатки; 2 – канавки; 3 – перегородки между канавками

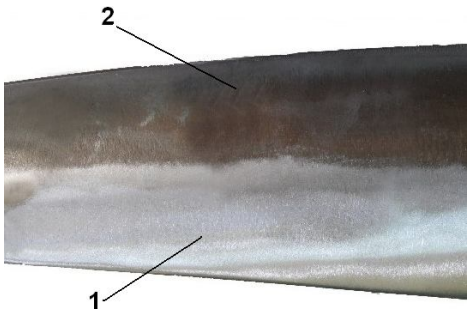

Рис. 7. Зона лопатки с дискретной наплавкой после механической обработки: 1 – перо лопатки; 2 – участок лопатки с дискретным наплавленным покрытием

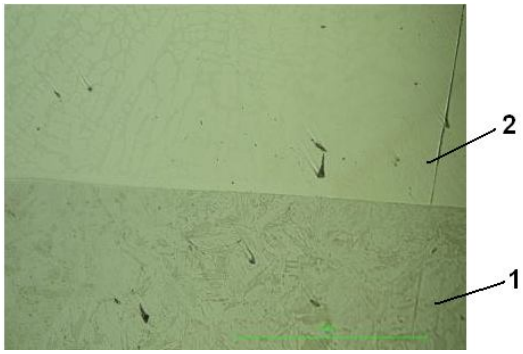

Рис. 8. Структура материала Stellite, наплавленного внутри канавки: 1 – основной материал лопатки; 2 – наплавленный материал

Результаты усталостных испытаний образцов из стали 15Х11МФ с двухслойными наплавленными покрытиями показали на явное преимущество плазменной наплавки по сравнению с аргонодуговой (рис. 10). Испытания проводились на плоских образцах с асиметрично расположенным двухслойным покрытием. Первый слой покрытия толщиной 1,5 мм был наплавлен из материала Nistelle, второй слой также толщиной 1,5 мм был получен методами наплавки из материала Stellite. Снижение усталостной прочности деталей с покрытиями, по сравнению с деталями без покрытий, составило: для импульсной аргонодуговой наплавки – 40 – 50 %, для плазменной наплавки – 15 – 20 %.

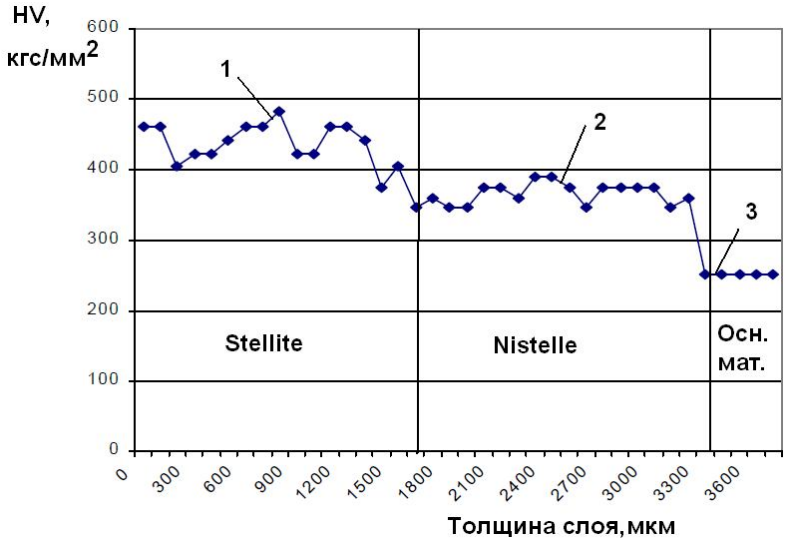

Рис. 9. Изменение микротвердости двухслойного покрытия (Stellite + Nistelle): 1 – слой Stellite; 2 – слой Nistelle; 3 – основной материал – сталь 15Х11МФ

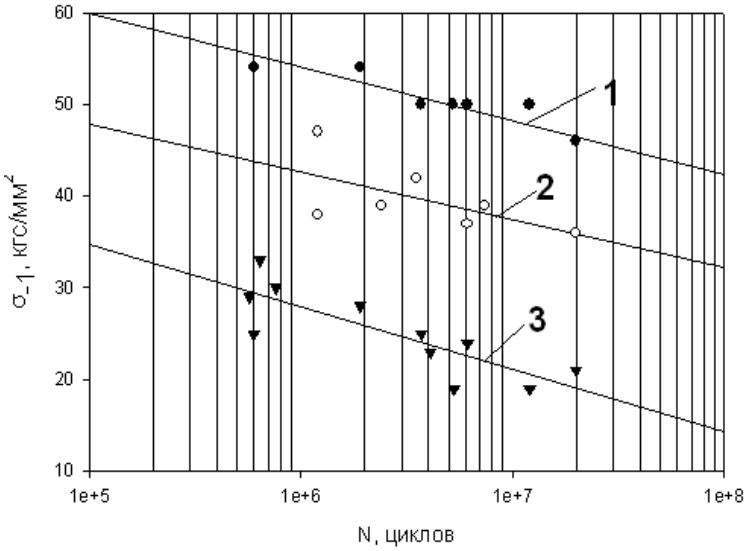

Рис. 10. Результаты усталостных испытаний образцов из стали 15Х11МФ с двухслойным наплавленным покрытием: 1 – исходное состояние; 2 – плазменная наплавка; 3 – импульсная аргонодуговая наплавка

Рис. 11. Многослойное вакуумно-плазменное покрытие на наплавленном слое: 1 – наплавленный слой Stellite; 2 – многослойное ионно-плазменное покрытие

Стойкость к капельно-ударной эрозии образцов из стали 15Х11МФ с покрытиями исследовалась по методике МЭИ на стенде «Эрозия» при соударении жидких частиц размером 800 мкм и скоростью $C_{уд}$ = 300 м/с. Сравнительные испытания стеллитовых пластин с разработанными наплавленными покрытиями показало, что разработанное покрытие не уступает по эрозионной стойкости стеллитовым пластинам, а при дополнительном использовании многослойных вакуумно-плазменных покрытий системы – TiN-Ti-TiNX-TiX- (где X – металл «ноу-хау») толщиной 15 – 18 мкм (рис. 11), превосходит по стойкости стеллитовые пластины в 1,1 – 1,2 раза. Эффект, по-видимому, может быть объяснен, в частности, тем, что внешнее вакуумно-плазменное покрытие позволяет адаптироваться основному наплавленному слою в начальный период процесса эрозионного износа.

Выводы

Для защиты лопаток паровых турбин от капельно-ударной эрозии хорошо зарекомендовали себя как наиболее стойкие стеллитовые накладки. Однако технология припайки или приварки стеллитовых пластин достаточно трудоемка, а использование пластин приводит к снижению усталостной прочности лопаток и нарушению аэродинамики поверхности лопатки. Попытки использования различного рода вакуумно-плазменных покрытий из-за их малой толщины не принесли ощутимых результатов. Разработанная авторами новая [8] технология формирования методами наплавки дискретных эрозионно стойких покрытий является гибридным вариантом между обычной наплавкой и использованием стеллитовых пластин. Как показали результаты испытаний таких покрытий, они не уступают по эрозионной стойкости стеллитовым пластинам, но позволяют повысить усталостную прочность деталей, упростить технологию получения эрозионно стойкого слоя и улучшить аэродинамические характеристики. Поверхность разработанного покрытия, являясь сплошной, по сравнению с поверхностью, образованной со стеллитовыми накладками, позволяет произвести дополнительную защитно-упрочняющую обработку и тем самым повысить ее ресурс. Экспериментально установлено, что в качестве наплавляемого материала на стадии восстановления паровой лопатки хорошо показала себя смесь Nistelle (Eu TroLoy 16221.04 + ВПр-11-40Н), а на стадии формирования дискретного эрозионностойкого слоя – сплав Stellite. Установлено, что снижение усталостной прочности деталей с покрытиями составило: для импульсной аргонодуговой наплавки – 40 – 50 %, для плазменной наплавки – 15 – 20 %. Исследование микротвердости образцов с наплавленными слоями показало, что микротвердость слоя Stellite составляет HV = 470 кгс/мм^2, слоя Nistelle HV = 380 кгс/мм^2, а основного материала – стали 15Х11МФ HV = 250…230 кгс/мм^2. Наплавка сплава Stellite в предварительно подготовленные карманы позволяет произвести формирование дискретного защитного слоя при минимальном смешении наплавляемого материала с основным материалом подслоя и обеспечить низкий уровень остаточных напряжений в покрытии. Применение разработанного покрытия и технологии его нанесения повысило ресурс работы лопаток в 1,1 – 1,2 раза.