

УДК 621.002

Клауч Д.Н., Овсенко А.Н., Овумян Г.Г., Кущева М.Е., Щегольков Н.Н., Кудинов А.А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕСУРСА РАБОТЫ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Лопатки паровых и газовых турбин являются наиболее нагруженными и ответственными деталями турбин. Они изготавливаются из специальных теплостойких, коррозионно-стойких, высокопрочных сталей, титановых и жаропрочных сплавов, имеют высокие требования по точности и качеству поверхностного слоя. Поэтому технологические процессы изготовления турбинных лопаток должны быть производительными, обеспечивать заданные точностные параметры и формирование такого поверхностного слоя, состояние которого было бы рационально для условий эксплуатации конкретных лопаток (температура, среда, статические, динамические, знакопеременные нагрузки, ресурс). Обеспечение требуемого качества поверхностного слоя (ПС) при изготовлении турбинных лопаток имеет особое значение, т.к. материалы большинства из них обладают высокой чувствительностью к состоянию ПС и работают на пределе своих физико-механических свойств. Требуемый ресурс их работы и надежность можно обеспечить только путем формирования ПС, обладающего максимальными эксплуатационными свойствами в заданных условиях работы.

В ЦНИИТМАШ проведены комплексные исследования состояния ПС после различных методов обработки и его влияния на эксплуатационные свойства турбинных лопаток, изготовленных из коррозионно-стойких сталей, титановых и жаропрочных сплавов. Особое внимание было уделено финишным операциям технологического процесса обработки лопаток, которые оказывают основное влияние на формирование ПС. При абразивной обработке титановых и жаропрочных сплавов возникают высокие температуры и давления, которые создают предпосылки для активизации адгезионных и диффузионных процессов в зоне формирования ПС. В результате взаимодействия обрабатываемого, инструментального материала и окружающей среды (СОТС – смазочно-охлаждающих технологических сред) в ПС детали могут образоваться новые химические соединения и произойти перераспределение концентрации легирующих элементов [1, 2].

При нерациональных условиях абразивной обработки в ПС титановых сплавов могут возникать раз-

личные дефекты, главными из которых являются:

- 1) прижоги различной интенсивности;
- 2) адгезионные налипы с сеткой микротрещин;
- 3) кратеры, закрытые «намазанным» металлом;
- 4) глубокие риски (следы обработки крупными зернами) и шлам во впадинах;
- 5) слой с измененной микроструктурой;
- 6) слой с измененным химсоставом, в том числе газонасыщенный и продуктами износа инструментального материала;
- 7) микротрещины на поверхности основного металла;
- 8) остаточные напряжения растяжения.

Обработанная поверхность и ПС по своим микросвойствам гетерогенна. При малой шероховатости в процессе абразивной обработки формируется, как правило, нерегулярный микрорельеф с неоднородными по форме впадинами, выступами и со случайным распределением высот и шагов микронеровностей.

Перечисленные дефекты могут появляться как отдельно, так и в сочетании друг с другом.

Шлифовочные прижоги образуются в результате возникновения высоких температур при шлифовании. Их появление сопровождается газонасыщением, изменением структуры ПС, образованием микротрещин и больших остаточных напряжений растяжения. Образование прижога на титановых сплавах связано с развитием зоны окисных, гидроокисных, нитридных пленок и зоны структурно-фазовых превращений [3]. Особенно это характерно для сухого шлифования, при котором появляются окисные пленки различных оттенков. Под ними лежит слой, не имеющий явного кристаллического строения. Глубина этого слоя зависит от интенсивности прижога и составляет десятые и даже сотые доли микрона. Они обуславливаются среднеконтактными температурами шлифования.

Так, при экспериментальном шлифовании титановых сплавов абразивными кругами различных характеристик со скоростью резания $V=22$ м/с, с продольной подачей $S_{пр}>900$ мм/мин и усилием прижима $P_y<20$ Н средняя контактная температура достигала 500°C и наблюдались пленки бледно-соломенного цвета. В зоне средних скоростей, подач и усилий

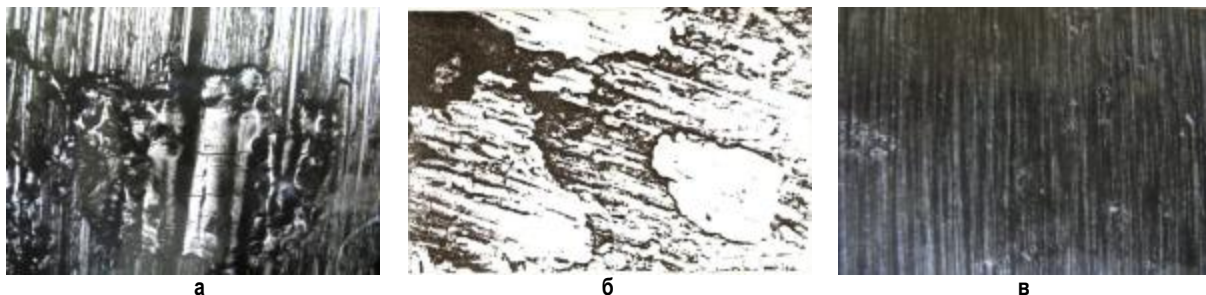


Рис. 1. Налипы на шлифованной поверхности титановых сплавов (общий вид):
а – сплав ТС5; б – сплав ТС5, $\times 85$; в – сплав ВТ22, $\times 225$

($V=20-30$ м/с, $Spr < 600$ мм/мин, $P_u=30-45$ Н) температура доходила до 850°C и образовывались пленки темно-желтого цвета. При больших скоростях резания и усилиях ($V > 30$ м/с, $P_u=60-70$ Н) температура достигала 950°C и более, а пленки приобретали сине-фиолетовый оттенок.

Травлением по специальной методике под пленками желтого, коричневого и сине-фиолетового цветов были выявлены прижоги; под пленками бледно-соломенного цвета прижоги отсутствовали.

Эффективным средством борьбы с прижогами является применение соответствующих СОТС, в частности жидкого углекислого газа. Так, если после сухого шлифования абразивным кругом 63С4ОНС2Б ($V=22$ м/с, $Spr=600$ мм/мин, $P_u=40-60$ Н) на поверхности образцов имелись пленки темно-желтого цвета с синими полосами, то охлаждение жидким CO_2 при тех же условиях шлифования снизило теплонапряженность процесса и на обработанной поверхности наблюдались пленки только бледно-соломенного цвета.

Кроме силы P_u и времени контакта обрабатываемого участка с абразивным кругом большое влияние на образование прижогов оказывает скорость шлифования. Снижение скорости шлифования до $10-15$ м/с практически исключает появление прижогов как при шлифовании всухую, так и с охлаждением.

Распространенным видом дефектов поверхности жаропрочных и титановых сплавов являются адгезионные налипы (рис. 1). При малом увеличении налипы видны на поверхности как многочисленные светлые пятна разной формы и размеров. При большом увеличении на этих белых пятнах хорошо просматривается сетка микротрещин, перпендикулярных следам обработки. Налипы представляют собой остатки стружки в виде сильно окисленного и оплавленного основного металла (рис. 2), попавшие на обработанную поверхность со шлифовального круга. Налипший металл огибает микронеровность основного металла, провисая над впадинами.

Его толщина изменяется от $3-5$ (над впадинами) до $15-20$ мкм и более (над выступами). Микротрещины имеют место только в налипах и в основной металл не распространяются. Налипы имеют слабое адгезионное сцепление с основным металлом и высокую микротвердость (до 10000 МПа при твердости исходного металла 3200 МПа). После удаления налипа под ним всегда обнаруживается небольшое углубление (кратер). Налип отличается повышенным содержанием кислорода и пониженным титана (по сравнению с основным металлом). Прижог синей окраски также имеет более высокое содержание кислорода и более низкое титана. Дефекты в виде адгезионных налипов имеют место при сухом

шлифовании с высокой скоростью резания, когда температура достигает значительной величины, стружка находится в расплавленном состоянии и зона резания не очищается от продуктов шлифования (шлама).

Дефекты в виде закрытых кратеров образуются в основном при полировании поропластовыми и войлочными кругами с наклеенным абразивом из электрокорунда или карбида кремния зеленого. В зависимости от условий полирования среднетемпературная температура ПС может изменяться в пределах $150-200^\circ\text{C}$. При этих температурах пластичность титановых сплавов существенно повышается, усиливается адгезионное взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом. За счет вырывания с ПС блоков зерен при схватывании основного металла с налипшим на абразив образуются кратеры, которые затем закрываются наволакивающимся металлом и металлом, налипшим на других абразивных зернах. Наволакивающийся ("намазан-



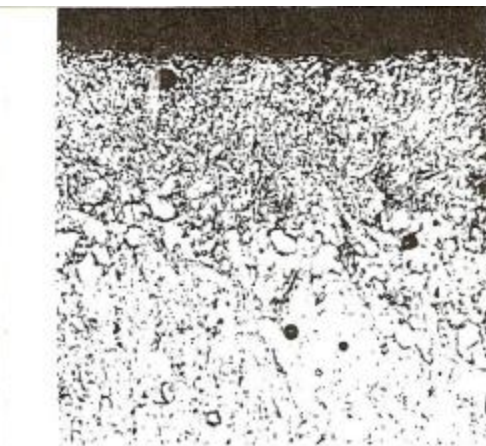
Рис. 2. Косой срез под углом 15° (по оплавленному дефектному пятну); сплав ТС5, $\times 385$



Рис. 3. Косой шлиф микронеровностей шлифованной поверхности сплава ТС5, угол 15°



а



б

Рис. 4. Шлам в канавках микронеровностей шлифованной поверхности сплава ТС5: а – внешний вид; б – косой шлиф, угол 15°

ный") металл из-за пластической деформации и газонасыщения имеет высокую микротвердость (до 8000 МПа). Люминесцентный контроль полированной поверхности не обнаруживает указанных дефектов, т.к. наволакивающийся металл и кратеры не имеют трещин. Кратеры обнаруживаются только после легкого травления обработанной поверхности.

Величина шероховатости шлифованной поверхности (Ra, Rz) не может в полной мере характеризовать микрогеометрию ПС. Исследования под микроскопом показали, что поверхность титанового сплава после шлифования весьма неоднородна, покрыта нерегулярными вмятинами и наплывами, ориентированными в направлении резания. Форма впадин микронеровностей весьма разнообразна.

Многие впадины имеют вид узких канавок с рваными краями. Отдельные канавки глубоко проникают в металл, что характерно для сухого шлифования, при котором выпавшие крупные абразивные зерна не смываются с поверхности, а участвуют в процессе шлифования, оставляя глубокие риски (рис. 3).

Отсутствие удаления отходов шлифования ведет также к тому, что многие микроканавки забиты плотными сгустками шлама, микротвердость которого доходит до 10000 МПа (рис. 4).

Края некоторых канавок из-за боковых пластических деформаций металла при шлифовании сходятся и при внешнем осмотре (под микроскопом) они кажутся меньшей ширины, чем на самом деле.

Микроструктура, микротвердость и микротрещины в ПС в основном определяются силовой и тепловой напряженностью процесса обработки. При шлифовании на низких скоростях резания ($V=15-20$ м/с) и с небольшими силами ($P_y=15-25$ Н) изменений в структуре и микротвердости ПС практически не происходит. Сухое шлифование абразивным кругом 54С50НС2Б3 с $P_y=40$ Н и $V=15$ м/с вызвало в тонком ПС (до 5 мкм) увеличение микротвердости с 3000 до 5200 МПа (рис. 5).

Изменений микроструктуры основного металла не обнаружено. При шлифовании абразивным кругом

14А50СЛБ (электрокорунд нормальный, зернистость 50 на бакелитовой связке) с $P_y=60$ Н и $V=20$ м/с в ПС обнаружена зона с сильно измельченным зерном (рис. 6) глубиной до 100 мкм и слой повышенной микротвердости глубиной до 15 мкм.

Шлифование кругом 24А50СМ2Б (электрокорунд белый зернистостью 50 на бакелитовой связке) с большой скоростью и силой прижима вызвало существенные изменения микроструктуры ПС на большую глубину. Тонкий ПС до 50 мкм имел измельченное зерно, переходящее в крупное, которое на глубине 0,75 мм принимало структуру основного металла. Несмотря на это изменение микротвердости обнаружено только на глубине до 30 мкм, что можно объяснить интенсивным разупрочнением ПС в результате его нагрева до высоких температур.

Кроме пластических деформаций в ПС титановых сплавов при шлифовании протекают сложные физико-химические процессы: диффузия кислорода, водорода, азота и других элементов; образование окислов, гидридов, нитритов и других химических соединений, охрупчивающих ПС. В результате интенсивного поглощения водорода, которое происходит при температуре 300°C, кислорода (при температуре 500°C) и азота (при температуре 600°C) на поверхности титановых сплавов образуется газонасыщенный слой. Все

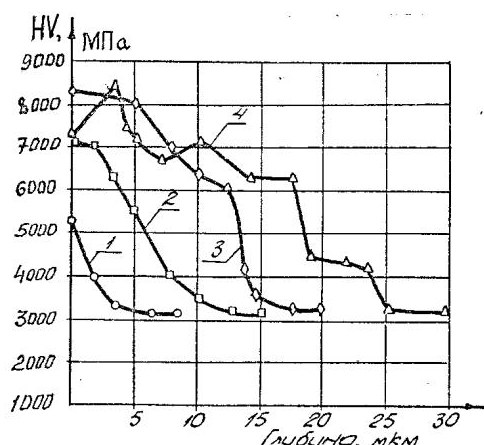
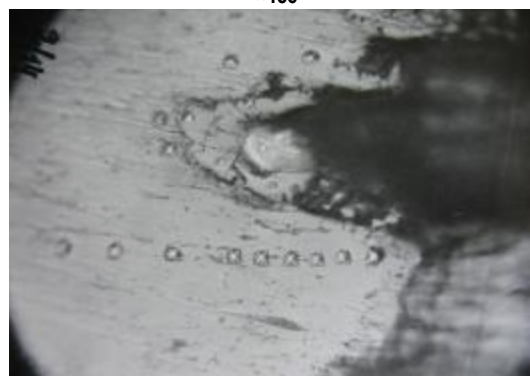


Рис. 5. Микротвердость поверхностного слоя титанового сплава ТС5 после шлифования:
 1 – круг 54С50НС2Б3; $V=15$ м/с; $P_y=40$ Н; 2 – круг 14А50С1Б; $V=15$ м/с; $P_y=60$ Н; 3 – круг 63С40НС1Б3; $V=22,5$ м/с; $P_y=70$ Н; 4 – круг 24А50СМ2Б; $V=40$ м/с; $P_y=60$ Н



×156



×265

Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя титанового сплава ТС5 после шлифования без охлаждения:
 а – кругом 54С50НС2Б3; $V=15$ м/с; $P_y=40$ Н; б – кругом 14А50С1Б; $V=20$ м/с; $P_y=60$ Н

эти процессы приводят к неоднородным фазово-структурным превращениям ПС, которые могут вызвать образования микротрещин (рис. 7).

Обычно они имеют место в местах прижогов, идут примерно под углом 45° к направлению обработки и различимы только при большом увеличении ($\times 800$ и более). После шлифования кругами из карбида кремния зеленого зернистостью 40 на бакелитовой связке (63С40НС2Б) с охлаждением жидким CO_2 изменений структуры и микротвердости ПС не обнаружено.

Микрорентгеноспектральные исследования состава ПС титановых сплавов после абразивной обработки кругами из карбида кремния зеленого показали наличие кремния в виде отдельных включений (рис. 8, 9).

Это указывает в основном на адгезионный характер переноса кремния с абразивного круга на обработанную поверхность.

Наличие кремния выявлено также на поверхности титанового сплава после шлифования абразивными лентами ЛБ51С25П (карбид кремния черный). В зависимости от вида СОЖ кремний по разному распределяется на обработанной поверхности. В случае применения эмульсии "Аквол-2" повышенное содержание кремния наблюдалось в местах налипов (рис. 10).

При использовании водного раствора фосфата калия повышенное содержание кремния обнаружено в канавках микронеровностей. Характер распределения

кремния на шлифованной поверхности указывает на то, что его включения являются мелкими осколками и продуктами износа абразивных зерен. Включения кремния, но в значительно меньших количествах, чем при шлифовании, имеют место на поверхностях, прошедших после шлифования абразивное и алмазное полирование.

В результате большой химической активности на поверхности титановых сплавов всегда присутствует окисная пленка. После шлифования титановых сплавов количество кислорода в ПС существенно превышает содержание кислорода в поверхностной окисной пленке.

Усталостные испытания образцов в условиях асимметричного цикла нагружения ($\sigma_{ст}=250$ МПа; $t=20^\circ\text{C}$) на базе 10^8 циклов показали, что предел усталости существенным образом снижается с повышением шероховатости поверхности. Так, при увеличении шероховатости с 0,22 до 1,1 мкм предел усталости круглых образцов из сплава ВТ3-1 уменьшился с 245 до 195 МПа, т.е. на 20%, а с увеличением шероховатости до $Ra=4,15$ мкм уменьшился до 165 МПа.

Влияние поверхностных дефектов на усталостную прочность исследовалось на плоских образцах из сплава ВТ20. Одна партия образцов изготавливалась по технологии, рекомендованной для крупных лопаток паровых турбин и обеспечивающей бездефектную обработку. Вторая партия имела дефекты в виде адгезионных налипов, кратеров, закрытых «намазанным» металлом, микротрещин и остаточных напряжений растяжения. Усталостные испытания показали снижение предела выносливости второй партии образцов по сравнению с первой



а



б

Рис. 7. Микротрещины на дне микронеровностей после шлифования титанового сплава ТС5, круг – 63С40НС2Б; $V=22,5$ м/с; $P_y=70$ Н, без охлаждения:
а – внешний вид, $\times 800$; б – косой шлиф, угол 15° , $\times 285$

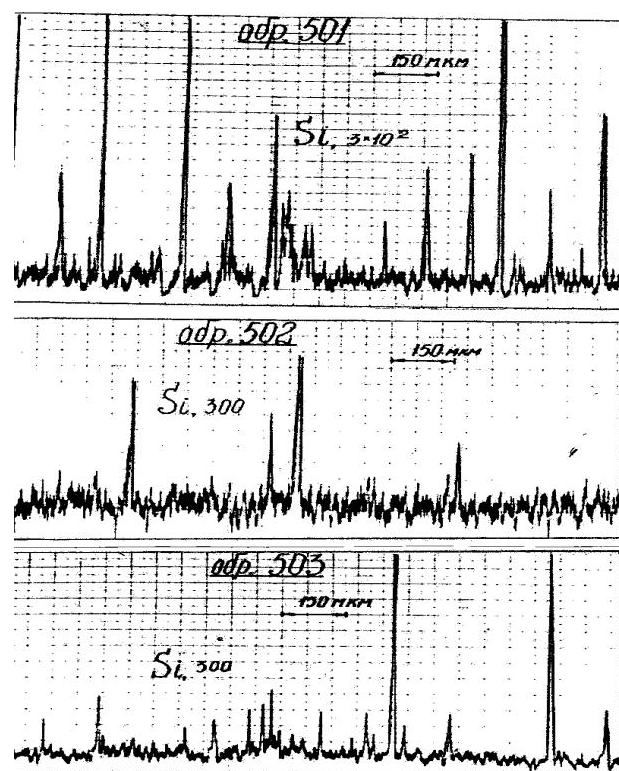


Рис. 8. Распределение кремния в ПС титанового сплава ТС5; обр. 501 – шлифование; обр. 502 – шлифование + абразивное полирование; обр. 503 – шлифование + абразивное полирование + алмазное полирование

с 290 до 240 МПа (на 14%), что говорит о высокой чувствительности титановых сплавов к состоянию ПС.

Исследование усталостных свойств сплавов ЭП800 и ЦЖ-20 при 800°С показало значительное влияние концентраторов напряжений и отсутствие влияния остаточных напряжений. Методы и режимы финишной бездефектной обработки практически не влияют на жаропрочные свойства при длительных испытаниях, на характеристики прочности и пластичности сплавов ЭП800 и ЦЖ-20 при испытаниях на растяжение как при комнатной, так и при рабочих температурах. Гидродробеструйное упрочнение образцов (ГДУ) из сплава ВТ5 повысило предел выносливости на 21%, а ультразвуковое упрочнение – только на 3%. Долговечность образцов после ГДУ в зоне ограниченной выносливости в 10–15 раз выше, чем неупрочненных образцов. Упрочнение титановых сплавов микрошариками (\varnothing 0,016–0,16 мм) также сопровождалось повышением усталостной прочности примерно на 2–3%.

Анализ эпюр остаточных напряжений после ГДУ, УЗУ и УМШ совместно с результатами усталостных испытаний позволил сделать вывод, что усталостная прочность материалов после ППД определяется не только величиной остаточных напряжений сжатия в ПС, но также глубиной их залегания и градиентом изменения напряжений по глубине ПС. Однопереходное упрочнение ППД не обеспечивает формирования рациональной эпюры остаточных напряжений. Наилучшие результаты по усталостной прочности обеспечивает комбинированное упрочнение (ГДУ+УМШ, ВУ+УМШ, УЗУ+УМШ и др.), что связано с образованием эпюры остаточных напряжений, имеющей большую глубину проникновения сжимающих напряжений, практическое отсутствие послойного максимума, высокий уровень напряжений на поверхности и небольшие градиенты изменения напряжений по глубине.

Заключение

При абразивной обработке жаропрочных, коррозионно-стойких и титановых сплавов в ПС могут возникать дефекты в виде прижогов, адгезионных наливов, кратеров, глубоких ямок, микротрещин, шлама во впадинах неровностей, изменённой микроструктуры и химсостава, остаточных напряжений растяжения. Они существенно снижают эксплуатационные свойства турбинных лопаток.

Эффективным средством повышения надежности и ресурса работы лопаток паровых турбин является упрочнение методами ППД. Наиболее эффективно

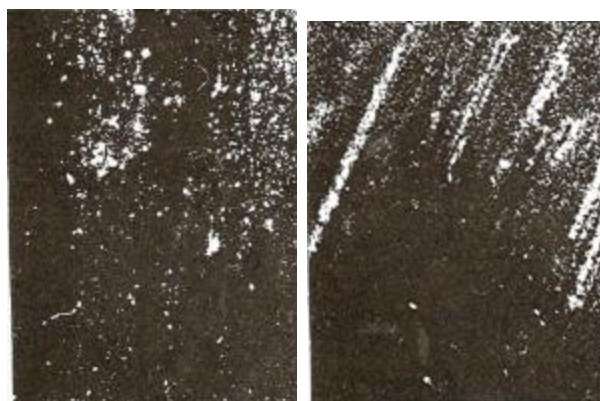


а



б

Рис. 9. Растровые изображения шлифованной поверхности титанового сплава ТС5 во вторичных электронах (а) и в характеристическом излучении $K_{\alpha}Si$ (б); $\times 400$



а

б

Рис. 10. Растровые изображения поверхности титанового сплава ВТ20 в рентгеновском излучении кремния $K_{\alpha}Si$ после шлифования абразивными лентами ЛБ51С25П с охлаждением эмульсией «Аквол-2»; $\times 200$

двухпереходное упрочнение по схемам: ГДУ+УМШ, ВУ+УМШ, УЗУ+УМШ, которое обеспечивает повышение усталостной прочности лопаток на 20–25%.

Список литературы

1. Мухин В.С., Шустер Л.Ш. Износ инструментов, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. Уфа: УфАИ, 1987. 217 с.
2. Сулима А.М., Шувалов В.А., Ягудкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
3. Ломакина И.В., Королев Н.В. О шлифовочных прижогах титановых сплавов // Вестник машиностроения. 1973. № 3. С. 69–72.

List of literature

1. Mukhin V.S., Shuster L.S. Tool wear, quality and durability of the parts of the aviation materials. Ufa: UfAI, 1987. P. 217.
2. Sulima A.M., Shuvalov V.A., Yagudkin Y.D. Surface coating and operation properties of the parts. M.: Machine-building, 1989. P. 216.
3. Lomakin I.V., Korolev N.V. About grinding bums of the titanic alloys // Vestnik of machine-building. 1973. № 3. P. 69–72.