

УДК 621.891;620,194

В.В. Шевеля, Г.С. Калда

ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен анализ и сделано апробирование некоторых технологических способов предупреждения усталостного разрушения в условиях фреттинг-коррозии с целью последующего определения возможностей использования каждого из методов для разработки рекомендаций для конкретных условий.

Защита сопряженных деталей от повреждения фреттинг-коррозией весьма сложная и важная проблема, которая приобретает особую актуальность при одновременном действии объемных циклических нагрузок. Иногда применяющиеся для защиты сопряженных деталей жидкие и твердые смазки на основе дисульфида молибдена, различные гальванопокрытия, фосфатирование и хромирование, латунирование и другое не обладают достаточной эффективностью. Более того, можно встретить прямо противоположные рекомендации. Например, в одних случаях хромирование рекомендуется как способ повышения усталостной прочности в условиях фреттинг-коррозии, в других указывается на то, что хромирование как антифреттинговая защита не эффективно.

Все методы защиты от повреждения при фреттинг-коррозии делятся на конструктивные и технологические. Однако, как бы методы не подразделялись, в основе лежат либо устранение перемещения одной поверхности относительно другой, либо облегчение этого перемещения настолько, чтобы оно происходило с минимальным трением. И в одном, и в другом случаях стремятся модифицировать поверхности контакта с целью минимизировать износ при фреттинг-коррозии.

Авторами проведен анализ и сделано апробирование некоторых технологических способов предупреждения усталостного разрушения в условиях фреттинг-коррозии с целью последующего определения возможностей использования каждого из них для разработки рекомендаций для конкретных условий.

При исследовании возможностей технологических методов для предупреждения усталостного разрушения в условиях фреттинг-коррозии ставились задачи определения перспективности, эффективности и области возможного применения способа повышения качества авиационных материалов.

Существует много широко известных методов поверхностного упрочнения и повышения износостойкости деталей путем их термической, химико-термической или механической обработки [1-7]. Каждый из этих методов находит свою определенную область применения.

Материалы, работающие в условиях фреттинговой усталости, подвергаются как объемному циклическому нагружению, так и изнашиванию в результате развития фреттинг-коррозии. Поэтому защитные покрытия для этих материалов должны сочетать два качества: высокую износостойкость при фреттинг-коррозии и положительное или нейтральное влияние на усталостные характеристики.

В авиационной промышленности широко применяются такие методы химико-термической обработки, как цементация, азотирование, цианирование. Однако эти методы показали недостаточную износостойкость при фреттинг-коррозии. Поэтому представляло интерес проверить защитные свойства в условиях фреттинговой усталости, алитирования, борирования, хромирования, ванадирования, обладающих высокой износостойкостью, на примере стали 30ХГСА.

Алитирование проводилось в порошковой смеси следующего состава: 16 % Al (порошок), 81 % Al_2O_3 , 3 % NH_4Cl при температуре 950 °С в течение 2 ч, в результате чего образовался диффузионный слой толщиной 0,1 мм. Микротвердость алитированного слоя меняется от 6150 МПа у поверхности до 3500 МПа у границы с основным металлом. Поверхностная хрупкая зона, имеющая относительно высокую микротвердость, легко выкрашивается, поэтому слой обладает малой деформационной способностью. Трещины, зарождающиеся в поверхностной зоне, благодаря сравнительно небольшой разнице твердости прилегающего к границе с основным металлом диффузионного слоя и основного металла (3500...3250 МПа), по-видимому, легко распространяются вглубь металла.

Испытания алитированных образцов из стали 30ХГСА проводились также в условиях фреттинговой усталости, т.е. циклическое нагружение сочеталось с одновременным контактным воздействием на поверхность образца. Полного разрушения диффузионного слоя не наблюдается. Разрушение образцов происходит вне зоны фреттинг-коррозии. Значения долговечности образцов, испытанных без фреттинг-коррозии и в условиях фреттинг-коррозии, имеют отличия в пределах погрешности эксперимента (рис. 1).

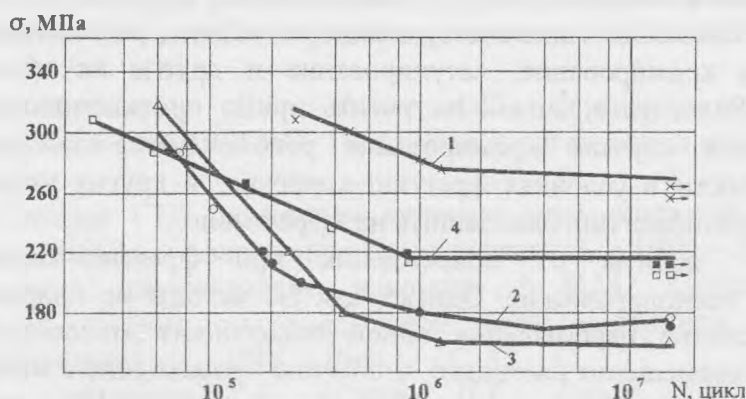


Рис. 1. Разрушение образцов стали 30ХГСА:

1, 3 – без покрытия в отсутствие фреттинга и в условиях фреттинг-усталости соответственно; 2 – после алитирования в отсутствие фреттинга (o) и в условиях фреттинг-усталости (•); 4 – после борирования в отсутствие фреттинга (□) и в условиях фреттинг-усталости (■)

В области малоциклового усталости (до $N=400 \cdot 10^3$ циклов) алитирование снижает долговечность в большей степени, чем фреттинг-коррозия. Положительный эффект алитирования дает только при испытаниях после $(400 \dots 500) \cdot 10^3$ циклов, при этом повышение усталостной прочности составляет 10 % (на базе 10^7 циклов). Таким образом, для стали 30ХГСА применение алитирования по приведенному режиму нецелесообразно в области малых долговечностей.

Борирование проводилось в следующем составе ванны: 84 % карбид бора B_4C , 16 % бура, температура 950 °С, время выдержки 6 ч, толщина диффузионного слоя 0,15...0,16 мм, микротвердость слоя боридов 20 000 МПа.

Испытания борированных образцов на усталость с одновременным действием фреттинг-коррозии не показали существенного изменения долговечности по сравнению с чисто усталостными испытаниями. Борирование ведет себя аналогично алитированию. Кривая 4 (рис. 1) построена по точкам, соответствующим испытаниям при чистой усталости, а также испытаниям при фреттинг-усталости. Однако, если сравнить зависимости $\sigma = f(N)$ для борирования и для стали 30ХГСА без покрытия (рис. 1, кривые 3 и 4), то борирование даст положительный эффект в повышении циклической прочности. На базе 10^7

циклов это повышение составляет 35 %, т.е. более существенно в сравнении с алитированием.

Газовое контактное хромирование проводилось в порошковой смеси, состоящей из 50 % феррохрома, 43 % окиси алюминия Al_2O_3 и 7 % хлористого аммония NH_4Cl при температуре 1100 °С в течение 10 ч. На поверхности образуется диффузионный слой толщиной 0,020...0,025 мм, состоящий из сложных карбидов. Микротвердость карбидной зоны составляет 15 000 МПа. Под слоем карбидов располагается травящаяся переходная зона, микротвердость которой почти не отличается от основного металла. К переходной зоне прилегает слой обезуглероженного металла, имеющего пониженную микротвердость в сравнении с основным металлом.

Несмотря на довольно значительное снижение усталостной прочности, диффузионное хромирование благодаря высокой твердости карбидного слоя задерживает разрушение поверхностного слоя образцов в условиях фреттинговой усталости (рис. 2).

Диффузионное хромирование можно использовать для защиты деталей, работающих в условиях фреттинговой усталости. Важным преимуществом диффузионного хромирования является то, что независимо от сложности и рельефа поверхности покрываемых деталей покрытие формируется равномерно по всей поверхности, что обусловлено высокой подвижностью атомов хрома [8]. Однако использование диффузионного хромирования по приведенному промышленному режиму для восстановления изношенных деталей нецелесообразно из-за большой длительности процесса, малой получаемой толщины покрытия и его несплошности.

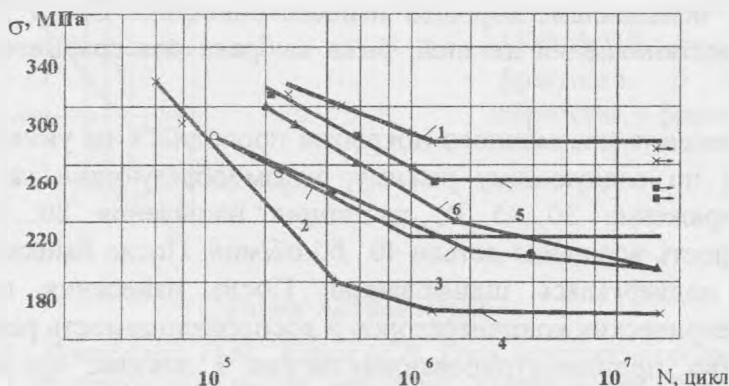


Рис.2. Кривые усталости стали 30ХГСА:

- 1, 4 – без покрытия в отсутствие фреттинга и в условиях фреттинг-усталости соответственно; 2, 3 – после хромирования в отсутствие фреттинга и в условиях фреттинг-усталости соответственно; 5, 6 – после ванадирования в отсутствие фреттинга и в условиях фреттинг-усталости

Диффузионное насыщение ванадием проводилось в порошковой смеси, содержащей 60 % феррованадия, 33 % окиси алюминия Al_2O_3 и активатора – 7 % хлористого аммония, при температуре 1100 °С в течение 10 ч. На поверхности образцов образуется тонкий диффузионный слой 0,015...0,018 мм, состоящий из твердого раствора ванадия в железе с вкраплениями карбидов ванадия. Ванадий препятствует рекристаллизации при охлаждении образцов, поэтому прилегающий к диффузионному слою металл состоит из крупных кристаллов. Диффузионный слой хотя и тонкий, но имеет большую плотность, чем, например, диффузионный слой после хромирования. Повышение циклической прочности ванадированных образцов при фреттинговой усталости составляет 30 % (рис. 2). Положительным качеством ванадирования является высокая чистота поверхности детали после диффузионного насыщения.

Таким образом, все рассмотренные покрытия по степени повышения циклической прочности в условиях фреттинг-коррозии расположились в таком порядке: алитирование – хромирование – ванадирование – борирование. Для защиты деталей, работающих в условиях фреттинговой усталости, целесообразно применение последних трех видов диффузионных покрытий, позволяющих повысить усталостную прочность на 20...35 % по сравнению со сталью 30ХГСА без покрытия, подвергавшуюся циклическому нагружению в условиях фреттинг-коррозии. Для таких покрытий, как хромирование, ванадирование, необходимо проверить возможность использования дополнительной термической обработки с целью повышения эффективности влияния этих покрытий на циклическую прочность. Применение новых технологических процессов при химико-термической обработке позволяет резко интенсифицировать процесс диффузионного насыщения и использовать некоторые виды химико-термической обработки для восстановления изношенных деталей и повышения циклической прочности в условиях фреттинг-коррозии.

Рассмотрим один из методов поверхностной пластической деформации, применяющийся для улучшения усталостных характеристик материалов в условиях фреттинг-коррозии. Речь идет о плазменном напылении, которое является одной из разновидностей поверхностной металлизации и обладает присущими ей достоинствами: технологической простотой, кратковременностью процесса и экономичностью, что открывает широкие возможности для применения этого метода в ремонтном производстве.

После дробеструйной обработки образцов плазменным методом напылялись такие материалы, как 11Х18МВД, 4Х13, У10А. Первые два материала, разработанные в Институте проблем материаловедения НАН Украины, представляют собой высоколегированные хромистые стали, обладающие хорошей износостойкостью. Сталь У10А, применяющаяся для ремонта и восстановления деталей, была выбрана для сравнительной оценки первых двух материалов.

Процесс нанесения плазменного покрытия проводился на универсальной плазменной установке УПУ-3 по следующему режиму: плазмообразующий газ – аргон; сила тока 450...550 А; напряжение 30...35 В; дистанция напыления 80...120 мм; расход газа 22...30 л/мин; скорость вращения детали 40...60 об/мин. После нанесения покрытий рабочая часть образцов подвергалась шлифованию. После нанесения покрытий происходит залечивание геометрических концентраторов и воспроизводимость результатов повышается.

Анализ данных, проиллюстрированных на рис. 3, показал, что все покрытия снижают фреттинг-усталостную прочность испытанных материалов по сравнению с дробеструйной обработкой. По-видимому, в тонком поверхностном слое основного материала при нанесении покрытия происходит частичная релаксация напряжений сжатия, создаваемых предварительной дробеструйной обработкой.

Покрытия из стали 4Х13 показали наименьший отрицательный эффект. Сталь 4Х13 при толщине покрытия 0,25 мм создает более высокие сжимающие напряжения, что обусловило минимальное снижение усталостной долговечности сталей 30ХГСА и 40ХНМА, а на стали 45 наблюдается даже ее повышение. Влияние покрытий объясняется действием нескольких конкурирующих факторов, к которым относятся значение и знак напряжений в слое покрытия, степень релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое образца, прочность связи покрытия с подложкой и др. При испытаниях в условиях фреттинг-коррозии к перечисленным факторам можно отнести еще износостойкость и коррозионную стойкость покрытий.

Таким образом, из полученных результатов видно, что применение плазменных покрытий для обеспечения фреттинг-усталостной прочности сопряжений не эффективно.

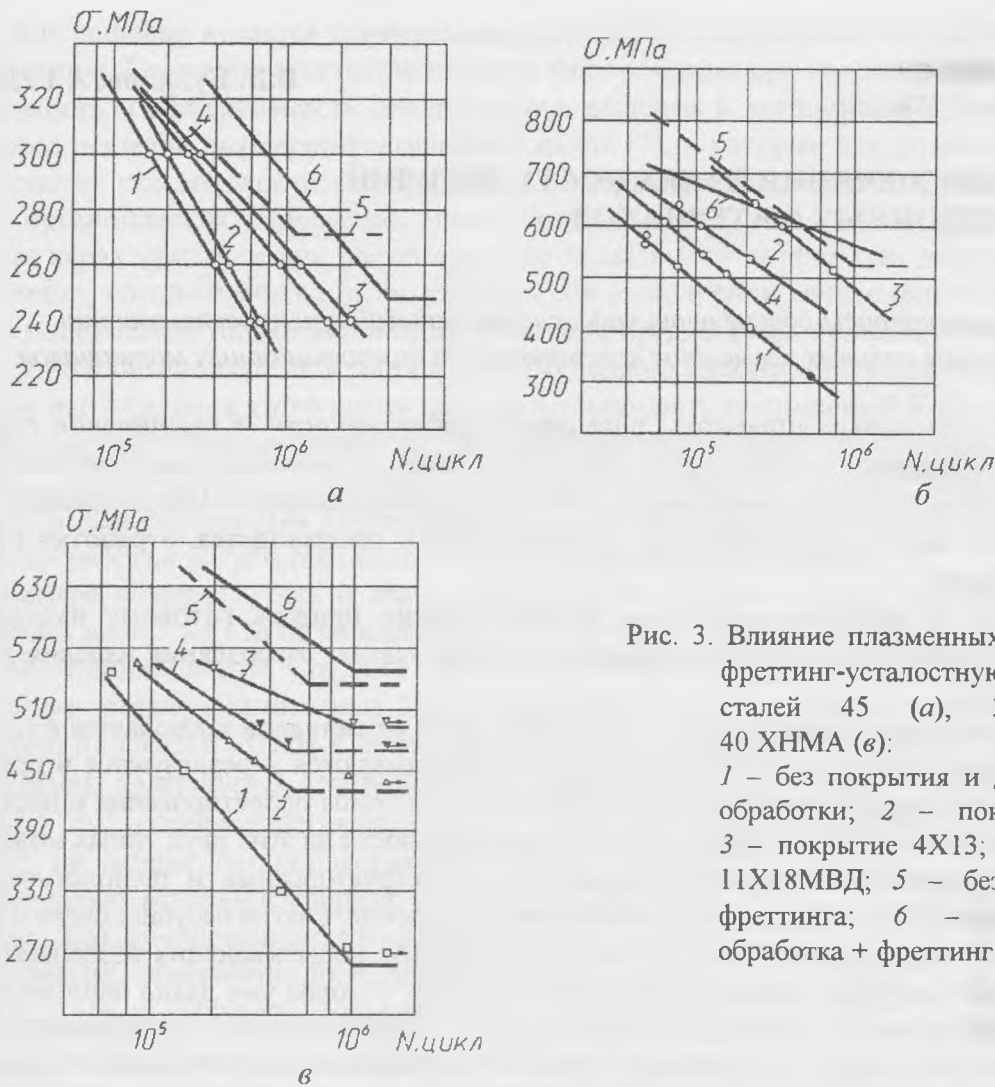


Рис. 3. Влияние плазменных покрытий на фреттинг-усталостную прочность сталей 45 (а), 30ХГСА (б), 40 ХНМА (в):

1 – без покрытия и дробеструйной обработки; 2 – покрытие У10А; 3 – покрытие 4Х13; 4 – покрытие 11Х18МВД; 5 – без покрытия и фреттинга; 6 – дробеструйная обработка + фреттинг

Список литературы

1. Билонога Ю.Л., Яремченко Н.Я., Клым М.В. Роль контактного давления в процессе фреттинг-усталости // Физико-химическая механика материалов, 1986. – Вып.22, №5. – С. 108-109.
2. Повышение фреттингостойкости деталей грузовых автомобилей // Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
3. Похмурский В.И., Билонога Ю.Л., Сирак Я.Н., Герман Н.В. Некоторые принципы разработки фреттингостойкой смазки // Физико-химическая механика материалов, 1985. – Вып.21, №6. – С. 85-86.
4. Jones W.J.D., Lee G.M.C. The fretting fatigue behavior of mild steel with electrodeposited nickel and Ni-Co alloys with controlled internal stresses // Wear, 1981. – Vol.68. – P. 71-84.
5. Junshy D., Baoyu Z., Weililuo. The fretting behavior of a nitrided steel 38CrMoAl // Wear, 1988. – Vol.125, №2. – P. 193-204.
6. Rie K.-T., Lampe Th., Broszeit E., Schweighofer B.O. Schwingungsverschleissfestigkeit von plasmanitrier dem 34CrAlMo5 // Z. Werkstofftech, 1986. – V.17, №10. – S. 370-388.
7. Waterhouse R.B. Residual stress and fretting crack initiation and propagation // Adv. Surface Treat. – Oxford, 1987. – Vol.4. – P. 511-525.
8. Алябьев А.Я., Духота А.И., Зеленков И.А. Поглощение водорода и его влияние на изнашивание титановых сплавов при фреттинг-коррозии // Проблемы трения и изнашивания. – К. – 1982. – №21.

Стаття надійшла до редакції 5 вересня 2000 року.