

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2020-5-112-119

УДК 621.35

**Влияние электролитического хромирования на усталостную
прочность деталей**

С. В. Малыш¹, И. М. Ковенский^{2*}, Л. З. Чаугарова²

¹ПАО «Тюменские моторостроители», г. Тюмень, Россия

²Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: kovenskijim@tyuiu.ru

Аннотация. Проведены исследования на деталях с электролитическим хромом с целью установления влияния покрытия на усталостную прочность. Работа проводилась в соответствии с ГОСТ РВ 2840-001-2008. Образцы для проведения испытаний были изготовлены из стандартных лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Для возбуждения колебаний был использован электродинамический вибростенд ВЭДС-1500 с усилителем мощности УМК-12К. Показано, что минимальный предел выносливости 46 кгс/мм² на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, установленный на деталях без покрытия, при проведении усталостных испытаний компрессорных лопаток с гальваническим слоем хрома не снизился. Установлено влияние геометрии хромированной детали на снижение предела выносливости.

Ключевые слова: усталостная прочность; хромирование; предел выносливости; геометрия детали

Influence of chrome electroplating on fatigue strength of parts

Sergey V. Malyshev¹, Ilya M. Kovenskij^{2*}, Larisa Z. Chaugarova²

¹Tyumen Engine Builders PAO, Tyumen, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: kovenskijim@tyuiu.ru

Abstract. The article is devoted to the results of studies, which have been conducted on parts with electrolytic chromium in order to determine the effect of the coating on fatigue strength of their. The work was performed in observance of standards, which are fixed in GOST RV 2840-001-2008. Samples for the tests

were made from standard gas turbine engine compressor blades. We used a VEDS-1500 electrodynamic vibration stand with an UMK-12K power amplifier to excite vibrations. It has been shown that the minimum endurance limit of 46 kgf/mm² based on $2 \cdot 10^7$ cycles, established on uncoated parts, didn't decrease during fatigue tests of compressor blades with an electroplated chrome layer. It should be stressed that the influence of the geometry of the chrome-plated part on the reduction of the endurance limit has been established.

Key words: fatigue strength; chrome plating; endurance limit; part geometry

Введение

Гальванические хромовые покрытия, применяемые при ремонте нефтегазового оборудования, позволяют восстановить размер деталей. Но вследствие того, что в покрытиях возникают высокие остаточные напряжения растяжения [1], они оказывают влияние на механические свойства основного металла [2, 3] и в первую очередь на предел выносливости.

В ряде работ отмечается снижение предела выносливости на 20–70 % по сравнению с пределом выносливости стали без покрытия. В частности, в работе [4] показано, что высокая концентрация дефектов хромовых покрытий является следствием состояния поверхности основного материала. Большой разброс в результатах можно объяснить тем, что в проведенных исследованиях не учитывались такие важные факторы, влияющие на предел выносливости детали, например, как состояние поверхности основного материала в целом [5, 6]. Несмотря на имеющиеся работы, ощущается недостаток материалов по изучению влияния переменных нагрузок, которым подвержены хромированные детали в процессе работы.

В данной работе проведены исследования по определению минимального предела выносливости на деталях с электроосажденным хромом с целью установления влияния покрытия на усталостную прочность.

Объект и методы исследования

Работа проводилась в соответствии с ГОСТ РВ 2840-001-2008¹ на лопатках компрессора из стали ЭИ961 путем сопоставления минимального предела выносливости профиля пера лопаток со слоем электролитического хрома толщиной 40–50 мкм и без него (на всех лопатках в соответствии с технологическим маршрутом производилось упрочнение поверхности микрошариками в течение 25 минут).

Минимальный предел выносливости лопаток без покрытия был установлен ранее и составляет 451 МПа.

Усталостные испытания проводили путем возбуждения резонансных механических колебаний профильной части пера лопатки по первой изгибной форме при нормальной температуре и симметричном цикле нагружения со

¹ ГОСТ РВ 2840-001-2008. Надежность и безотказность авиационных двигателей. Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://translate.1bm.ru/techdocs/kgs/gost/244/info/32678/>.

ступенчато увеличивающейся нагрузкой на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов с целью определения минимального предела выносливости.

Экспериментальная часть

Образцы для проведения усталостных испытаний были изготовлены из 6 стандартных лопаток компрессора газотурбинного двигателя, на которые был нанесен электролитический слой хрома. Хром осаждали в стандартном электролите.

Для оценки напряженно-деформированного состояния лопаток и определения области максимальных переменных напряжений на поверхности пера в характерных местах профиля были наклеены фольговые тензорезисторы 2ФКП-5-200-А-12-С базой 5 мм с электрическим сопротивлением активной решетки $R = 200$ Ом. Марка клея, используемого для наклейки тензорезисторов при проведении испытаний, — Циакрин ЭО ТУ 6-09-30-86.

Тензометрирование лопаток показало, что максимальные переменные напряжения в пере действуют на спинке в прикорневом сечении в области максимальной толщины лопатки.

Для возбуждения колебаний лопаток был использован электродинамический вибростенд ВЭДС-1500 с усилителем мощности УМК-12К.

Уровень нагружения первой лопатки составил $\sigma_a = 46$ кгс/мм².

Испытания вели по индивидуальным тарировочным зависимостям $\sigma_a = f(2A)$, устанавливаемым по каждой лопатке (σ_a — максимальное напряжение в пере лопатки; $2A$ — размах колебаний точки торцевого сечения пера, измеряемый с помощью катетометра КМ-8). Контроль над режимом нагружения лопаток в процессе испытаний осуществляли по тензорезистору и размаху колебания торца пера лопатки. В случае выхода из строя тензорезистора в процессе испытаний, контроль уровня переменных напряжений осуществлялся по величине амплитуды перемещений периферийного сечения пера лопатки.

За критерий начала разрушения лопатки принимали падение собственной частоты колебаний на 1 % от первоначального значения. После испытаний лопатки подвергались люминесцентному контролю ЛЮМ1-ОВ (И₅М₁₄П₆).

Собственная частота колебаний по первой изгибной форме каждой лопатки определялась на резонансной частоте лопатки при максимальном размахе торцевого сечения пера ($2A$) при $\sigma_a = \text{const}$.

Результаты

Результаты испытаний на выносливость лопаток представлены в таблице.

После снятия лопаток с испытаний, из-за снижения собственной частоты колебаний, с помощью капиллярного метода контроля на лопатках были обнаружены трещины. Трещины находились либо на входной, либо на выходной кромках, в среднем сечении пера лопатки, то есть в местах, имеющих нагрузку ниже максимальной (согласно тензометрированию, нагрузка приблизительно соответствовала 80 % от максимальной), но являющихся концентраторами напряжений. Ранее испытываемые лопатки (не имеющие покрытия) всегда разрушались в месте максимальных напряжений (в прикорневом сечении пера лопатки).

Результаты испытаний лопаток

Инд. номер лопаток	Собственная частота, Гц	Начальное нагружение σ_a , кгс/мм ²	Нагружение при перегрузке σ , кгс/мм ²	Количество циклов, N	Примечание
1	633	46 48	— — 50	$2 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^7$ 18 627 048	Прошла базу испытаний без разрушения. Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.
2	653	46	— 48	$2 \cdot 10^7$ 479 653	Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.
3	689	46 48	— — 50	$2 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^7$ 5 506 488	Прошла базу испытаний без разрушения. Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.
4	633	46 48	— — 50	$2 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^7$ 2 597 832	Прошла базу испытаний без разрушения. Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.
5	644	46	— 48	$2 \cdot 10^7$ 2 387 952	Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.
6	617	46	— 48	$2 \cdot 10^7$ 426 470	Прошла базу испытаний без разрушения. Разрушилась. Трещина по перу.

Обсуждение

Таким образом, из результатов испытаний следует, что в области максимальных напряжений все 6 лопаток, поверхность которых изначально до нанесения хрома имела сжимающие напряжения вследствие обработки микрошариками, после нанесения хрома выдержали нагрузку $\sigma = 46$ кгс/мм² при базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов. То есть снижения минимального предела выносливости в области максимальных напряжений не было обнаружено, но, как отмечалось выше, поломка лопаток происходила в местах концентраторов напряжений. Вместе с тем область определения минимального предела выносливости (место максимальных напряжений) отличается плавными переходами профиля пера лопатки и отсутствием концентраторов напряжений. Поломку лопаток на входной и выходной кромках можно объяснить совокупностью следующих причин:

- при нанесении электролитического хрома в этих местах создаются повышенный потенциал и, следовательно, более высокая плотность тока, что

может приводить к дефектам хромового покрытия [4] (росту дендритов и других дефектов покрытия);

- входная и выходная кромка, вследствие малых радиусов сечений профиля лопатки, являются концентраторами напряжений при переменных нагрузках на профильной части пера лопатки.

Таким образом, если перед нанесением хромового покрытия в поверхностном слое лопатки создаются сжимающие остаточные напряжения, такие лопатки имеют минимальный предел выносливости (в месте максимальных напряжений) не ниже, чем лопатки без покрытия.

С целью установления причин разрушения лопаток на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3M проведены фрактографические исследования изломов двух лопаток после усталостных испытаний (№ 3 и № 5). Изломы, образовавшиеся в процессе испытаний, были вскрыты долотом лопаток путем приложения значительных переменных напряжений на испытательном стенде.

На рисунке 1 представлено изображение излома лопатки № 3. Имеются два участка: участок с хромовым покрытием (на данном участке наблюдаются трещины в слое хрома) и участок без покрытия. На карте распределения хрома по излому, построенной с помощью микрорентгеноспектрального анализа (рис. 2), в районе радиуса выходной кромки на небольшом участке протяженностью порядка 2–3 мм наблюдается скол хромового покрытия.

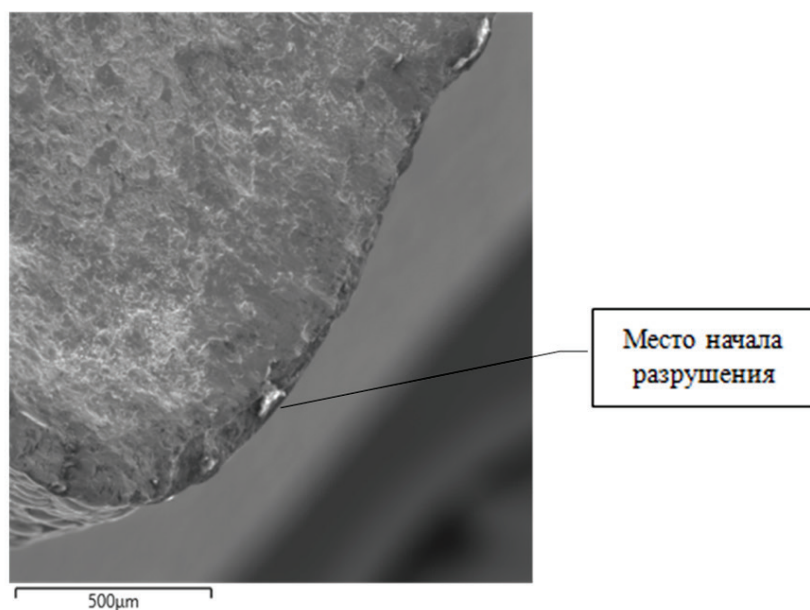


Рис. 1. Фрагмент излома лопатки № 3 после усталостных испытаний

В то же время данный участок является местом начала усталостного разрушения лопатки, о чем свидетельствует распространение бороздок, по которым происходило развитие разрушения (рис. 3).

Разрушение лопатки № 5 происходило аналогично.

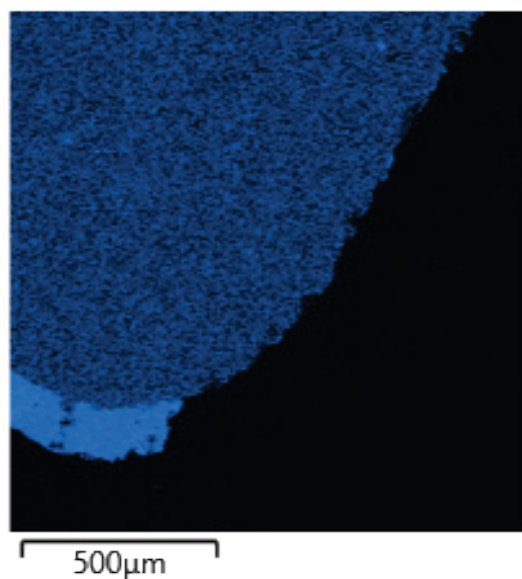


Рис. 2. Карта распределения хрома по сечению лопатки в месте излома
(светлый участок — слой электролитического хрома)

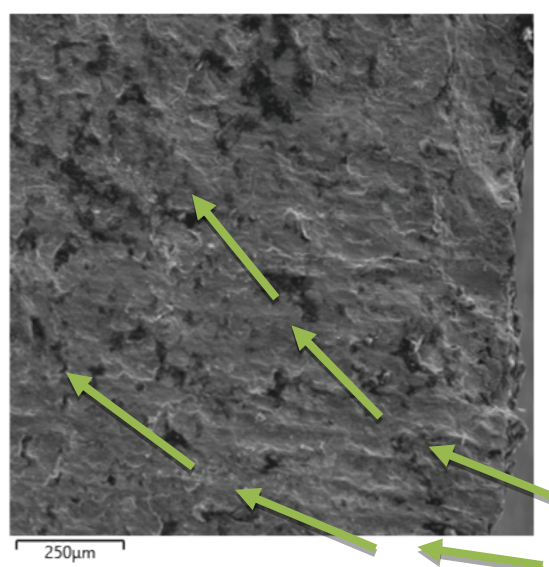


Рис. 3. Место начала разрушения лопатки
(стрелками показаны направления развития трещины)

Из проведенных исследований видно, что при специальной подготовке профиля пера лопатки (снятие напряжений после механической обработки и создание в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений) после нанесения электролитического хрома, осаждаемого с напряжениями растяжения, минимальный предел выносливости в местах плавных линий поверхности не уменьшается. Но при этом лопатка разрушается в местах, где при нанесении хрома создаются условия для осаждения дефектного хрома и

одновременно являющихся концентраторами напряжений при приложении к перу лопатки знакопеременных нагрузок.

Выводы

Показано, что минимальный предел выносливости 46 кгс/мм^2 на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, установленный ранее на лопатках без покрытия, при проведении усталостных испытаний компрессорных лопаток с гальваническим слоем хрома не снизился. Необходимо отметить, что наличие на образце областей, имеющих более высокий потенциал (более высокую плотность тока или неравномерное распределение плотности тока по поверхности детали), при нанесении гальванического хрома может приводить к повышенной концентрации дефектов и, соответственно, к снижению предела выносливости.

Библиографический список

1. Аджиев, Б. У. Современная технология хромирования / Б. У. Аджиев, Б. У. Рогожин, З. А. Соловьева. – Текст : непосредственный // Материалы краткосрочного семинара (14–15 декабря) / Под ред. Л. Я. Богорада. – Ленинград : ЛДНТП, 1976. – 116 с.
2. Брондз, Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л. Д. Брондз. – Москва : Машиностроение, 1986. – 184 с. – Текст : непосредственный.
3. Вороницын, И. С. Исследование механических свойств хромовых покрытий, применяемых для упрочнения и восстановления деталей машин : монография / И. С. Вороницын. – Ленинград : ЛАТТ, 1963. – 210 с.
4. Устюгов, А. Г. Исследование дефектов хромовых покрытий / А. Г. Устюгов // Мир гальваники. – 2008. – № 3. – С. 18–21.
5. Рябой, А. Я. Повышение ресурса авиационных деталей из высокопрочных сталей / А. Я. Рябой, Л. Д. Брондз. – Москва : Машиностроение, 1977. – 103 с. – Текст : непосредственный.
6. Грилихес, С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С. Я. Грилихес. – Москва : РХТУ, 1994. – 191 с. – (Библиотечка гальванотехника : Приложение к журналу «Гальванотехника и обработка поверхности»; Вып. 1). – Текст : непосредственный.

References

1. Adzhiev, B. U., Rogozhin, B. U., & Solov'eva, Z. A. (1976). Sovremennaya tekhnologiya khromirovaniya. Materialy kratkosrochnogo seminar (December, 14-15). Leningrad, LDNTP Publ., 116 p. (In Russian).
2. Brondz, L. D. (1986). Tekhnologiya i obespechenie resursa samoletov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 184 p. (In Russian).
3. Voronitsyn, I. S. (1963). Issledovanie mekhanicheskikh svoystv khromovykh pokrytiy, primenyaemykh dlya uprochneniya i vosstanovleniya detaley mashin. Leningrad, LATT Publ., 210 p. (In Russian).
4. Ustyugov, A. G. (2008). Issledovanie defektov khromovykh pokrytiy. Mir gal'vaniki, (3), pp. 18-21. (In Russian).
5. Ryaboy, A. Ya., & Brondz, L. D. (1977). Povyshenie resursa aviatsionnykh detaley iz vysokoprochnykh staley. Moscow, Mashinostroenie Publ., 103 p. (In Russian).
6. Grilikhes, S. Ya. (1994). Obezzhirivanie, travlenie i polirovanie metallov. Moscow, RKhTU Publ., 191 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Малыш Сергей Владимирович, главный металлург, ПАО «Тюменские моторостроители», г. Тюмень

Ковенский Илья Моисеевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: imkoven@tsogu.ru

Чаугарова Лариса Зиннуровна, аспирант кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Sergey V. Malysh, Chief Steelworker, Tyumen Engine Builders PAO, Tyumen

Ilya M. Kovenskiy, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Material Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: kovenskijim@tyuiu.ru

Larisa Z. Chaugarova, Postgraduate at the Department of Material Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen