

*А. П. Кудрин, канд. техн. наук, проф.,
В. В. Жигинас, асп.,
В. Ф. Лабунец, канд. техн. наук, проф.,
Ю. Б. Бурбела, студ.*

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Национальный авиационный университет

Представлены результаты исследования влияния лазерного легирования на триботехнические характеристики титанового сплава ВТ6, испытанного в условиях трения–скольжения в среде смазки МС-20. Показано, что лазерное легирование значительно уменьшает интенсивность изнашивания и коэффициент трения испытанных образцов из титанового сплава.

Общая постановка проблемы и ее связь с научно–практическими задачами. В современной технике в качестве конструкционных материалов все более широкое применение находят сплавы на основе титана. Среди многих физико–механических характеристик титановых сплавов важнейшая, безусловно, высокая удельная прочность (соотношение прочности и плотности), а повышенная коррозионная стойкость обеспечивает титану широкое применение в судостроении, химической промышленности (там, где это экономически оправдано) и в медицине [1].

Основными потребителями титановых сплавов являются авиационная, ракетная и космическая техника, где главным требованием является высокая удельная прочность. Следует отметить, что в настоящее время невозможно создание газотурбинных двигателей без применения титановых сплавов. Их используют для изготовления лопаток и дисков компрессоров, воздухозаборников, роторов и корпусов компрессоров, лопаток последних ступеней турбин, элементов шасси, механизации крыла и др. Замена стальных лопаток компрессора на титановые уменьшает суммарную массу лопаток в двигателе на 40–45 %, а массу дисков – на 20–25 %.

Одним из основных свойств, определяющих работоспособ-

ность деталей из титановых сплавов, эксплуатируемых в условиях контактного взаимодействия, является их износостойкость. Однако титановые сплавы склонны к схватыванию, задирам, что обуславливает их низкую износостойкость. В связи с этим повышение триботехнических характеристик титановых сплавов является одной из актуальных задач современного машиностроения, которая решается путем нанесения защитных покрытий.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Литературные источники, посвященные исследованию трибологических свойств упрочненных титановых сплавов, свидетельствует о том, что основными технологическими методами нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей из титановых сплавов является химико-термическая обработка, газотермическое напыление, электроискровое легирование и лазерное легирование, нанесение гальванических покрытий [2–7].

Наиболее распространенным методом, обеспечивающим работоспособность деталей из титановых сплавов в условиях контактного взаимодействия, является диффузионное насыщение различными элементами и, в частности, азотирование [2]. Перспективным направлением в инженерии поверхности является формирование покрытий на основе тройных соединений (карбооксидов, карбонитридов и оксинитридов), которые не только улучшают их триботехнические характеристики, но и коррозионные свойства [3].

Из гальванических покрытий, наносимых на титановые сплавы, наиболее широкое применение получило хромирование, которое повышает твердость (HRC 50–60), износостойкость и антифрикционность, однако, снижает усталостную прочность. Несмотря на высокую прочность сцепления покрытия с основой, из-за сетки микротрещин, вызванных внутренними остаточными напряжениями растяжения, при контактных нагрузках, возможны сколы покрытия. Кроме того, в процессе электролитического осаждения хрома на титановых сплавах происходит их наводороживание, что приводит к снижению эксплуатационных свойств.

Нанесение гальванических покрытий на титановые сплавы связано со значительными трудностями, которые определяются плохими адгезионными свойствами титана, склонностью к наводороживанию и чувствительностью к концентраторам напряжений

[4]. Поэтому нанесение гальванического покрытия достаточно сложный и неустойчивый процесс, включающий этапы обезводо-раживающего отжига, контроль зернистости и другие, а использование детонационного напыления может привести к снижению усталостной прочности и внезапным разрушениям конструкции. В связи с этим проводится широкий поиск антифрикционных покрытий для титановых сплавов, которые не ухудшают их механические свойства.

Для получения высоких физико-механических свойств гальванических покрытий на титановых сплавах, рекомендуется проводить термическую или химико-термическую обработку упрочненной детали. Так, например, диффузионный отжиг титанового сплава с гальваническим покрытием обеспечивает более высокую прочность сцепления.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования [5] по модификации поверхности титановых сплавов ионными и электронными лучами вместе с ионной имплантацией.

Назрела необходимость улучшать поверхностные свойства титановых сплавов при минимальном снижении объемных, прочностных и пластических характеристик. Одним из путей решения этой задачи является применение скоростного нагрева при комплексном диффузионном насыщении. Использование в этом случае предварительно нанесенных металлических покрытий позволяет значительно расширить возможности химико-термической обработки [6]. Так, например, промежуточное железное гальваническое покрытие на титановом сплаве перед его науглероживанием ускоряет процесс формирования диффузионного слоя, а также улучшает распределение микротвердости по его толщине, исключив образование хрупких карбидов титана.

Проведенные сравнительные исследования износостойкости образцов из упрочненного титанового сплава ВТ6 показали [7], что наилучшей износостойкостью обладает образец, прошедший трехминутное насыщение при температуре 1160 °С с толщиной подложки 0,14 мм, который в течении более чем 2000 мин практически не имел износа. Микротвердость этого образца изменялась от 15 ГПа у самой поверхности до 6 ГПа на глубине 0,6 мм.

Таким образом, применение железной подложки при науглероживании титанового сплава ВТ6 в условиях электронагрева позволяет предотвратить складывание карбидов, значительно увели-

чив толщину диффузионного слоя и повысить их твердость. При толщине промежуточного слоя 0,1–0,15 мм после нагрева до 928–1180 °С в течении 3 мин формируется диффузионный слой толщиной 250–1050 мкм с твердостью 1,3–23 ГПа. Износостойкость упрочненного титанового сплава ВТ6 значительно превосходит показатели неупрочненного.

Одним из перспективных и эффективных методов упрочнения титановых сплавов является электроискровое легирование, владеющее целым рядом преимуществ. Исследование особенностей абразивного изнашивания электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановых сплавах ВТ1-0, ВТ3-1, ВТ20 с использованием в качестве легирующих материалов композиционной керамики системы Al–Zr–Si–B–N свидетельствуют о перспективности применения этих упрочняющих технологий для повышения износостойкости деталей, изготовленных из титановых сплавов [8].

Если по уровню удельной прочности и коррозионной прочности титановые сплавы удовлетворяют требованиям конструкционного материала для современной техники и могут не только конкурировать, а даже превосходить многие другие конструкционные сплавы, то использование их в узлах трения без предварительной упрочняющей обработки или нанесения износостойких покрытий в большинстве случаев невозможно. Независимо от системы легирования, фазового состава и структурного состояния, уровня прочности и твердости сплавы на основе титана имеют низкие триботехнические характеристики в любом сочетании материалов пар трения [9]. Коэффициент трения технического титана в одноименной паре и паре с другими материалами во время трения скольжения в среде воздуха колеблется в пределах 0,48–0,68, а легирование титана, как α - так и β -стабилизирующими элементами и термическая обработка титановых сплавов незначительно повышают стойкость к схватыванию [10].

Не дает позитивных результатов изменение материала пары трения, который работает в контакте с титановым сплавом, и его твердости [9; 11]. В паре с более твердым металлом титан переносится на поверхность сопряженной детали, что вызывает образование одноименной пары титан–титан, а в паре с более мягким материалом – последний переносится на титан и снова образуется одноименная пара трения, которая не владеет высокими триботехни-

ческими характеристиками.

В случае использования в качестве сопряженного материала неметаллов (пластмассы, фторопласта, углеграфита и др.) в процессе трения твердые частички оксида титана внедряются в поверхность антифрикционного неметаллического материала, что стимулирует интенсификацию износа титана [12].

Исследование эффективности использования минеральных масел при трении титановых сплавов показали [13], что коэффициент трения почти такой же, как и в случае трения в воздухе (около 0,4–0,47). Только твердые смазочные материалы, такие как графит и дисульфид молибдена обеспечивают удовлетворительную работоспособность титановых сплавов в условиях трения.

Низкая износостойкость титановых сплавов и высокая его склонность к схватыванию объясняется особенностями атомного строения [14], а также низкой прочностью вторичных структур [15], которые возникают на их поверхности в процессе трения.

Таким образом, склонность к схватыванию, низкая износостойкость при трении в одноименных парах, так и в паре с другими материалами, высокий коэффициент трения и низкая эффективность смазочных материалов являются причиной того, что титановые сплавы непосредственно без соответствующих защитных покрытий не используются как конструкционные для деталей узлов трения.

Цель работы. Исследование влияния поверхностного упрочнения на триботехнические характеристики титанового сплава.

Материалы и методы исследования. Для исследований был выбран титановый сплав ВТ6, как один из наиболее распространенных конструкционных материалов в авиа- и ракетостроении, обладающий высокой удельной прочностью. В качестве упрочняющей технологии применяли лазерную обработку. Лазерную обработку проводили на установке Квант-15.

Триботехнические характеристики упрочненных и неупрочненных образцов определялись на усовершенствованной машине трения УТ-1 в диапазоне скоростей скольжения 0,05 – 2 м/с и удельной нагрузке – 2 МПа. В качестве контртела использовали закаленную сталь 45, а средой служило масло МС-20.

Металлографическое исследование проводили на микроскопе ММР-2Р с приставкой SCOPETEK DCM-130, позволяющей де-

лать цифровые снимки изображения с микроскопа. Электронно-микроскопические исследования проводили на электронном микроскопе Carl Zeiss Ultra. Для определения состава вторичных структур, образующихся на рабочих поверхностях исследуемых образцов в процессе трения и изнашивания применяли сканирующий оже-спектрометр Jamp-10S. Весовой износ определяли на аналитических весах KERN ABS 80-4 с точностью до четвертого знака (0,0001 г).

Результаты исследований и их анализ. Проведенные исследования показали существенное отличие триботехнических характеристик неупрочненных и упрочненных титановых образцов, испытанных в условиях трения–скольжения в среде МС-20 (рис. 1, 2) в диапазоне скоростей скольжения 0,05–2 м/с (рис. 1 и 2).

Так, при скорости скольжения 0,05 м/с износ упрочненных титановых образцов составляет 0,025 г, а неупрочненного – 1,8 г, что свидетельствует о повышении износостойкости титанового сплава после лазерной обработки в 72 раза. Между коэффициентом трения и интенсивностью изнашивания не наблюдается корреляция для исследованных пар трения, однако, при данной скорости скольжения, а именно 0,05 м/с, коэффициент трения неупрочненного титанового образца в 3 раза выше чем у упрочненного. С повышением скорости скольжения во всем исследуемом диапазоне коэффициент трения монотонно увеличивается при возрастании скорости скольжения, и при 2 м/с он достигает для неупрочненного титанового сплава 0,86, а для упрочненного – 0,23. Если в данном диапазоне скоростей скольжения износ для неупрочненного титанового сплава увеличивается в 2 раза, то для упрочненного – в 1,18 раза (от 0,17 при 0,05 м/с до 0,19 при 2 м/с). Это обусловлено различием в процессах, которые протекают на рабочих поверхностях испытываемых материалов.

Металлографические и электронно-микроскопические исследования неупрочненных и упрочненных образцов из титанового сплава свидетельствуют о том, что на рабочих поверхностях первых развиваются процессы схватывания, а на вторых – механохимического изнашивания. Процессы схватывания характеризуются не только повышенными значениями износа и коэффициента трения, но и интенсивным образованием на контактирующих по-

верхностях чередующихся надрывов и вырывов.

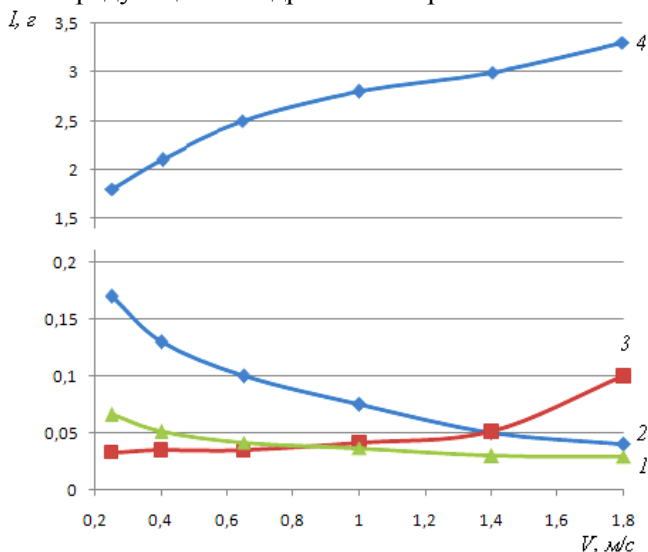


Рис. 1. Зависимость износа от скорости скольжения для неупрочненного (4) и упрочненного (3) титанового сплава при испытании на трение-скольжения в среде МС-20 в паре со сталью 45 (1, 2)

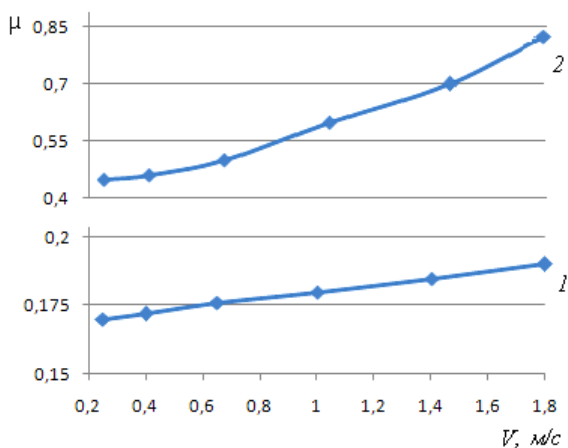


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения для пар трения: 1 – упрочненный титановый сплав – закаленная сталь 45; 2 – неупрочненный титановый сплав – закаленная сталь 45
Наблюдается налипание титанового сплава на поверхность за-

каленного стального образца, смятие и размазывание его в направлении движения (рис. 3), что свидетельствует об интенсивном развитии пластических деформаций поверхностных слоев исследуемых сплавов под действием механических сил, возникающих в процессе трения. Поверхностная деформация, как отмечается в работе [16] в этом случае способствует образованию ювенильных поверхностей трения, их сближению, образованию металлических связей и обуславливает интенсивность и характер разрушения поверхностей трения.

Исследования показали, что лазерное легирование титанового сплава в десятки раз уменьшает износ (см. рис. 1) и в 3–4 раза уменьшает коэффициент трения. Так, при скорости скольжения 1 м/с износ упрочненных титановых образцов в 100 раз меньше, чем неупрочненных.

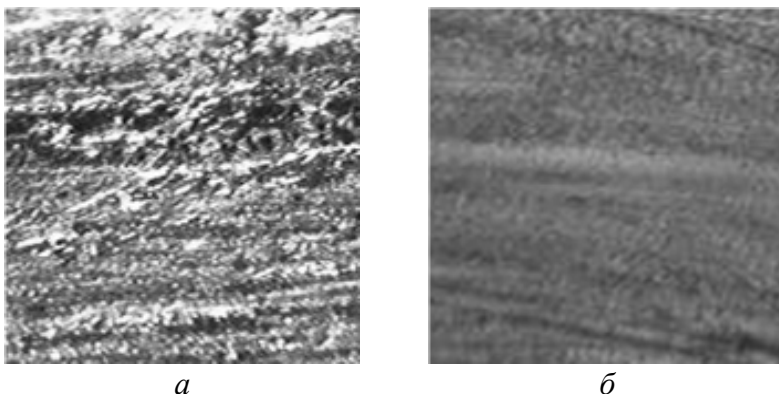


Рис. 3. Поверхности трения неупрочненного (*а*) и упрочненного (*б*) титанового сплава после испытаний при скорости скольжения 0,5 м/с и удельной нагрузке 2 Мпа, $\times 80$

Результаты испытаний упрочненного титанового сплава ВТ6 свидетельствуют о том, что определяющим является образование самоорганизующихся вторичных структур, обусловленных протеканием двух процессов: активации и пассивации.

Анализ вторичных структур показал, что они представляют собой пресыщенные твердые растворы кислорода, оксидов титана и железа, находящиеся в ультрадисперсном состоянии. С увеличением скорости скольжения количество углерода во вторичных структурах повышается. Кислород, как элемент пассиватор, в основном находится в виде оксидов, так как он обладает ничтожной растворимостью в железе и титане. Процессы образования и раз-

рушения вторичных структур находятся в динамическом равновесии и автоматически регулируются. На рабочих поверхностях пары трения отсутствуют глубокие вырывы и другие повреждения и разрушения поверхностных слоев (рис. 3, б). Все это обуславливает устойчивость процесса структурной приспособляемости материалов данной пары трения.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что лазерное упрочнение титанового сплава ВТ6 является перспективным методом повышения его износостойкости как конструкционного материала триботехнического назначения.

Список литературы

1. Патон Б.Є. Основні напрямки наукових досліджень з титанової проблематики в Україні / Б.Є. Патон, А.П. Шпак, О.М. Івасишин // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №3. – С.100–105.
2. Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. – М.: Металлургия, 1974. – 448 с.
3. Каптюг И.С. Влияние легирования на фрикционные свойства титана / И.С. Каптюг, В.И. Сыщиков // МиТОМ. – 1959.–№4. – С.8–11.
4. Клабукова А.Г. Повышение износостойкости титановых сплавов оксидированием / А.Г. Клабукова, А.М. Зуев // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1974. – №3. – С.120–124.
5. Фрейдлин М.Г. Выбор оптимального сочетания материалов в узлах трения, содержащих детали из титановых сплавов / М.Г. Фрейдлин, М.А. Никонов, А.Л. Гавзе и др. // Вест. машиностроения. – 1980.–№3. – С.15–19.
6. Духота О.І. Проблемні питання використання титанових сплавів в вузлах тертя авіаційної техніки / О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2008.– Вип.49. – Т.1. – С.14–26.
7. Rabinovich E. Frictional Properties of titanium and its alloys / E. Rabinovich // Met. Progress. – 1954.–Vol.65.–№2.– P.19–23.
8. Духота А.И. Абразивная стойкость электроискровых и комбинированных лазерно-электроискровых покрытий на легких сплавах / Духота А.И., Лабунец В.Ф., Жигинас В.В. и др. // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2007.– Вип.48. – С.185–195.
9. Носовский И.Г. О механизме схватывания металлов при трении / И.Г. Носовский // Трение и износ. – 1993.– Т.14.– №4.– С.19–24.
10. Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, И.Г.Носовский, Л.И.Бершадский, А.К.Караулов.– К.: Техніка, 1975. – 399 с.
11. Федірко В.М. Азотування титану та його сплавів / В.М. Федірко, І.М. Погрелюк. – К.: Наук. думка, 1995. – 220 с.

12. Федірко В.М. Формування на титані функціональних покриттів на основі сполук втілення за термодифузійного насичення / В. М. Федірко, І.М. Погреляк, О.І. Васьків // ФХММ. – 2006. – Т.42. –№3. – С.17–25.

13. *Перспективные технологии обработки поверхности при изготовлении и ремонте лопаток ГТД из титановых сплавов с применением мощных ионных и сильноточных электронных пучков* / А.Г. Пайкин, В.А. Шулов, А.В. Краников и др. // материалы междунар. конф. «Титан в СНГ 2006». под ред. А.В. Александрова и О.М. Ивасишина.– Межгос. ассоциация «Титан», 21–24 мая, 2006. – С.190 –205.

14. Ляхович Л.С. Диффузионное упрочнение металлов с предварительно нанесенными металлическими покрытиями / Л.С. Ляхович // Защитные покрытия на металлах, 1977. – Вып. 11. – С.18–20.

15. *Науглероживание титанового сплава ВТ6 в условиях быстрого нагрева* / М.Н. Бодяко, А.А. Шипко, В.А. Шыгый, С.Р. Ларчиков // Защитные покрытия на металлах. – 1987. – Вып. 21. – С.49–50.

16. Голего Н.Л. Исследование качественных и количественных закономерностей явлений схватывания металлов и методы борьбы с ними в машинах.– К.: РИО КИГВФ, 1960.– 59 с.

УДК 621.891

Кудрін А.П., Жигинас В.В., Лабунець В.Ф., Бурбела Ю.Б. Вплив лазерного зміцнення на триботехнічні характеристики титанового сплаву ВТ6 // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.152–161.

Подано результати дослідження впливу лазерного легування на триботехнічні характеристики титанового сплаву ВТ6, що досліджувався в умовах тертя-ковзання в середовищі мастила МС–20. Показано, що лазерне зміцнення зменшує інтенсивність зношування і знижує коефіцієнт тертя зразків з титанового сплаву.

Рис.: 3, список лит.: 16.

Kudrin A.P., Zhiginas V.V., Labunets V.F., Burbela U.B. Influence of laser strengthening on tribotechnical characteristics titanium alloy ВТ6

Introduce researching results of influence laser strengthening on the tribotechnical characteristic of titanium alloy ВТ6, that investigate on the border friction condition in the МС–20 lubrication. Shown, that laser strengthening reduce intensity of wear off and reduce factor of friction titanium alloy swatch.

Стаття надійшла до редакції 28.10.09.