Влияние степени дискретного упрочнения поверхности на триботехнические характеристики сталей и сплавов

Тарасова Т.В.
МГТУ “СТАНКИН”
г. Москва, Российская Федерация
tarasova952@mail.ru

Кузьмин С.Д., Белашова И.С.
МГТУ “МАИ”
г. Москва, Российская Федерация
sarvatas@gmail.com irina455@inbox.ru

Белоконь Т.Д.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация
pupushkin@gmail.com

Аннотация. **Развитие современных отраслей авиации невозможно без повышения долговечности и надежности выпускаемых изделий при одновременном снижении их материалоемкости и себестоимости. В процессе эксплуатации деталей авиакосмической техники и оборудования наиболее интенсивным механическим и тепловым воздействиям подвергается поверхностный слой деталей машин, выход из строя деталей в ряде случаев обусловлен недостаточной сопротивляемостью поверхности изнашиванию. Одним из эффективных путей решения этой задачи является разработка и внедрение прогрессивных методов поверхностного упрочнения, основанных на локальном воздействии высококонцентрированных источников энергии, подчиненных принципу дискретного упрочнения. Предложен метод дискретного лазерного упрочнения. Проведенные исследования показали, что упрочнение поверхности таким методом снижает коэффициент трения и существенно увеличивает износостойкость.**

Ключевые слова: **лазерная термообработка, дискретное упрочнение, коэффициент заполнения, коэффициент трения, износостойкость.**

Введение

В основе процесса изнашивания (согласно молекулярно-механической теории И.В. Крагельского) лежат три явления:

1. Взаимодействие поверхностей трения;
2. Изменения в поверхностном слое;
3. Разрушение поверхностей.

При приложении нагрузки к двум соприкасающимся пластинам в условиях взаимного перемещения будет происходить изнашивание в виде истирания, смятия и срезания микронеровностей. Естественно, что при этом разрушаются окисные пленки и в контакте оказываются ювенильные (не защищенные окисными пленками) поверхности соприкасающихся металлов [1, 2]. При этом возможно молекулярное взаимодействие, которое проявляется в виде адгезии и схватывания. В условиях сухого трения при нарушении режима смазки и разрушения окисных пленок в том случае, если сила молекулярного взаимодействия оказывается больше силы относительного перемещения, возникает заедание.

В результате молекулярного и механического взаимодействия структура поверхностного слоя будет изменяться вследствие:

- деформации материала в зоне трения;
- повышения температуры в зоне трения;
- химического действия окружающей среды.

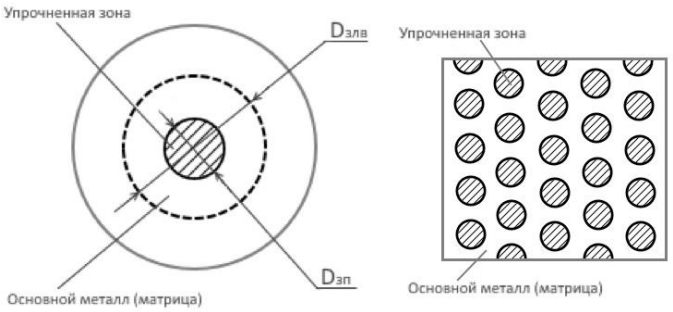
Наибольшую износостойкость обеспечивают режимы трения, соответствующие взаимодействию контактирующих поверхностей при сочетании упругого контактирования трущихся поверхностей и разрушения адгезионных связей в поверхностном слое химических соединений.

Одним из эффективных путей решения задачи увеличения износостойкости является разработка и внедрение прогрессивных методов поверхностного упрочнения, основанных на локальном воздействии высококонцентрированных источников энергии (лазерным и электронным лучами, плазменной струей).

Выбор метода поверхностного упрочнения

Метод поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками энергии заключается в воздействии интенсивного потока энергии на локальный участок поверхности материала, быстром (со скоростью до 10^8 град/с) его нагреве и охлаждении [3-5]. Под действием излучения происходит резкое повышение энергии электронов в поверхностном слое, при этом часть поглощенной энергии электроны передают атомам решетки, увеличивая, тем самым, уровень тепловых колебаний, а, следовательно, и температуру обрабатываемой поверхности. В процессе сверхскоростного нагрева и охлаждения в сталях происходят фазовые превращения, приводящие, при правильно подобранных режимах обработки, к упрочнению поверхности.

Для изделий, работающих в условиях трения и подверженных износу, перспективно выглядит технология дискретного лазерного упрочнения. При таком типе обработки открываются некоторые значительные преимущества лазерной технологии – это и сверхвысокие скорости нагрева/охлаждения и возможность обработки по определенной траектории без использования специальных приспособлений (вакуумная камера для обработки электронным лучом и плазменной струей), а также отсутствие динамического воздействия на обрабатываемую поверхность. Дискретное упрочнение или упрочнение в соответствии с принципом Шарпи подразумевает получение поверхности, в которой мягкая пластичная основа – матрица равно заполнена твердыми включениями, на которые в процессе эксплуатации и ложится основная нагрузка (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Схема зон упрочнения при обработке импульсным излучением лазера: *а* – импульсное излучение; *б* – схема размещения пятен упрочнения; $D_{зп}$ – диаметр зоны плавления при импульсном излучении; $D_{злв}$ – диаметр зоны лазерного воздействия при импульсном излучении

Данная методика позволяет получить поверхность, по характеристикам схожую с классическими антифрикционными сплавами, такими как Б83, БрО10 [6], но отличающимися от них более благоприятной формой твердых включений.

Так, в оловянном баббите Б83 эти твердые включения – кристаллы интерметаллида SnSb, имеют форму куба, а в бронзе БрО10 – включения $Cu_{31}Sn_8$ имеют остроугольную, сильно разветвленную форму. Такие формы включений приводят к снижению технологичности сплавов. При механическом нагружении формируются зоны высокой концентрации напряжений, что лишает эти сплавы как возможно достижимой прочности, так и пластичности. Наличие на твердой поверхности детали локальных неупрочненных участков с относительно более высокой пластичностью и вязкостью позволяет значительно повысить трещиностойкость упрочненных деталей в процессе эксплуатации без снижения износостойкости.

В целом при сложных условиях внешнего нагружения (совместном воздействии высоких температур, механических нагрузок и абразивных сред) упрочненные покрытия дискретного строения могут обладать более высокой эксплуатационной надежностью в сравнении с покрытиями сплошного строения. Процесс трения таких сплавов выглядит следующим образом [6]: в процессе приработки мягкая матрица интенсивно изнашивается до выступления твердых участков, приработка заканчивается когда контртело начинает полностью опираться на твердые частицы. Мягкая основа обеспечивает хорошую прирабатываемость, защитную реакцию материала на изменение условий трения (упругую и пластичную деформацию), кроме того при определенном расположении упрочненных участков, в мягкой основе может образовываться сеть каналов, по которым осуществляется вывод продуктов изнашивания и подвод смазки. Накопление продуктов износа приводит к налипанию, что в свою очередь обеспечивает резкое увеличение коэффициента трения и интенсивной износ сопряжения в целом.

В зависимости от времени кинетика процессов трения характеризуется кривой износа. На кривой износа в общем случае обнаруживаются три участка, соответствующие трем стадиям износа (рис. 2).

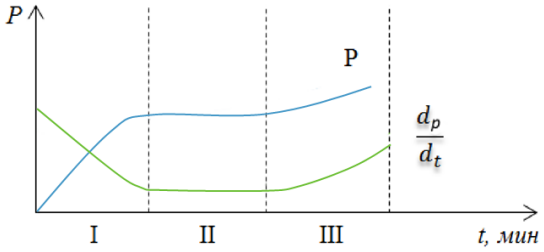


Рис. 2. Зависимость величины износа (P) и скорости изнашивания d_p/d_t от времени работы t: I-я стадия – начальный износ, наблюдается при приработке (сглаживание микронеровностей); II-я стадия, представленная на кривой прямолинейным участком, является режимом установившегося износа (tgα = const); III-я стадия – стадия катастрофического износа, характеризуется резко возрастающей скоростью износа

Определение износостойкости

В данной работе рассматривается износостойкость различных материалов, отличающихся твердостью упрочненных и неупрочненных поверхностей на стадии установившегося износа.

Наиболее важная триботехническая характеристика, определяющая работоспособность пары трения при повышенных нагрузках – коэффициент трения. Основным параметром, определяющим значение коэффициента трения для различных нагрузок, помимо твердости упрочненных и неупрочненных зон, является относительная площадь упрочненной поверхности или коэффициент заполнения ($K_{зап}$). Коэффициент заполнения определяется по формуле:

$$K_{зап} = \frac{S_y}{S_{обр}}$$

где S_y – суммарная площадь зон упрочнения; $S_{обр}$ – площадь образца.

В проведенных экспериментах использовались различные металлические сплавы, как цветные на основе Al, так и стальные – 20Х13, 40Х13 и др., обработанные дискретно лазерным излучением. Измерение на износостойкость проводили на установках СМЦ-2 и ХТИ-85[3, 6-10].

Обработку проводили при значениях коэффициентов заполнения поверхностей 0,3; 0,6 и 1,0 (твердость упрочненных зон составляла 6800 МПа, твердость неупрочненной лазером поверхности 5200 МПа). При гетерогенном упрочнении поверхности износостойкость снижается с уменьшением коэффициента заполнения. Наименьший износ образцов и сопряжений наблюдается при значении коэффициента заполнения $K_{зап} = 1$ [6] (рис. 3).

При лазерном легировании ниобием сплавов алюминия по режимам, обеспечивающим твердость упрочненных участков 6200 МПа (твердость неупрочненной поверхности 910 МПа) коэффициент заполнения ($K_{зап}$) обработанной поверхности варьировали от 0,3 до 1,0. Наименьший коэффициент трения был получен при коэффициенте заполнения поверхности равным 0,6 (рис. 4).

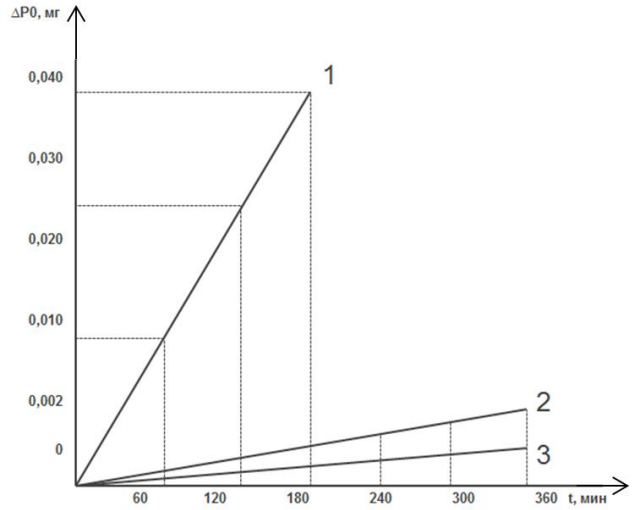


Рис. 3. Изменение износа образцов после лазерной цементации стали 20Х13 (E = 8 Дж, δ = 0,3 мм) при различном коэффициенте заполнения поверхности в процессе испытания на машине СМЦ-2: 1 – $K_{зап}$ = 0,3; 2 – $K_{зап}$ = 0,6; 3 – $K_{зап}$ = 1

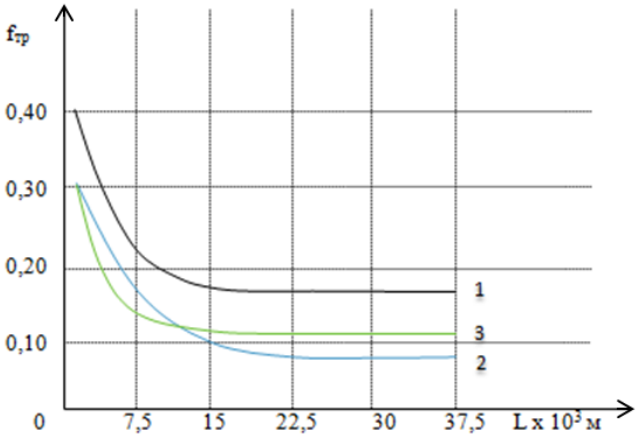


Рис. 4. Изменение коэффициента трения в процессе работы для различных коэффициентов заполнения (E = 18,5 Дж, δ = 0,3 мм): 1 – $K_{зап}$ = 0,3; 2 – $K_{зап}$ = 0,6; 3 – $K_{зап}$ = 1

Результаты измерений коэффициента трения поверхностей алюминиевых сплавов в парах трения сталь-алюминиевый сплав показали, что лазерное поверхностное легирование позволяет в 3-4 раза снизить коэффициент трения обработанной поверхности [7, 8].

Образцы из стали 40Х, подвергнутые лазерному легированию бором (твердость зон после лазерного воздействия 9500 МПа, твердость необработанной лазером поверхности 2170 МПа) показали, что наименьший коэффициент трения получается при $K_{зап}$ = 0,6 [10] (рис. 5).

Следует отметить, что с уменьшением разности в твердости основы и упрочненных зон износостойкость возрастает с увеличением коэффициента заполнения.

Выводы

Проведенные исследования показали, что в ряде случаев дискретное упрочнение поверхности снижает коэффициент трения и увеличивает износостойкость. Вместе с тем, несмотря на значительное количество опубликованных работ, в настоящее время нет общепризнанных рекомендаций по выбору параметров покрытий дискретного типа, их физико-механических и геометрических характеристик, обеспечивающих высокие показатели износостойкости рабочих поверхностей.

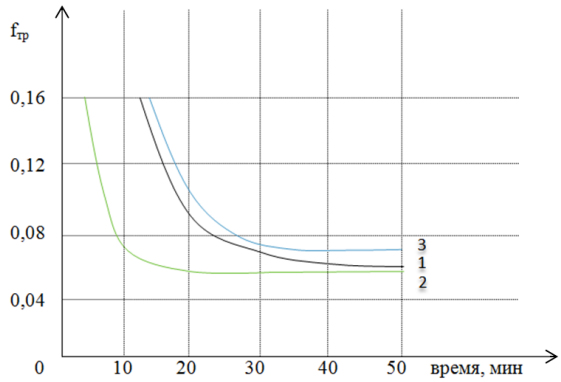


Рис. 5. Изменение коэффициента трения в процессе работы для различных коэффициентов заполнения(E = 12 Дж, δ = 0,3 мм): 1 – $K_{зап}$ = 0,3; 2 – $K_{зап}$ = 0,6; 3 – $K_{зап}$ = 1

Литература

1. Григорьев С.Н. Решение задач технологического перевооружения машиностроения // Инструмент – технология – оборудование. – 2008. – № 10. – С. 14-19.

2. Григорьев С.Н. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом / С.Н. Григорьев, И.Ю. Смуров // Инновации. – 2013. – № 10. – С. 2-8.

3. Tarasova T. Abrasive and fretting wear resistance of refractory cobalt alloy specimens manufactured by the method of selective laser melting / T. Tarasova, A. Nazarov, Yu. Shalapko // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, № 5. – P. 365-373.

4. Doubenskaia M. Comprehensive optical monitoring of selective laser melting / M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, E. Tikhonova, I. Smurov. // Journal of Laser Micro Nanoengineering. – 2012. – Vol. 7, № 3. – P. 236-243.

5. Andreev A.A. The use of pulsed ion stimulation to modify the stressed structure and mechfnical properties of vacuum-arc TiN coatings / A.A. Andreev, M.A. Volosova, V.F. Gorban and at. // Metallofizika I Noveishie Tekhnologii. – 2013. – Vol. 35. – P. 953-963.

6. Потехин Б.А. Свойства баббита марки Б83 / Б.А. Потехин, А.Н. Глущенко, В.В. Илюшин // Технология металлов. – 2006. – № 3. – С. 17-22.

7. Тарасова Т.В. Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов / Т.В. Тарасова, Г.О. Гвоздева, Е.П. Тихонова // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – № 2. – С. 140-143.

8. Александров В.Д. Поверхностное упрочнение алюминиевых сплавов. – М.: Техполиграфцентр, 2002. – 337 с.

9. Тарасова Т.В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионностойких сталей / Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 6. – С. 54-58.

10. Бурякин А.В. Разработка технологии лазерного легирования сталей бором и азотом: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1983. – 17 с.

Influence of Extent of Discrete Hardening of the Surface on Tribotechnical Characteristics of Stell and Alloys

Tarasova T.V.
Moscow State University
of Technology "STANKIN"
Moscow, Russian Federation
tarasova952@mail.ru

Kuzmin S.D., Belashova I.S.
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
Moscow, Russian Federation
sarvatas@gmail.com irina455@inbox.ru

Belokon T.D.
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation
pupushkin@gmail.com

Abstract. **The development of modern aviation industry is impossible without improving the durability and reliability of the let-out products and reducing their consumption of materials and cost. While in service parts of aerospace and equipment most intense mechanical and thermal influences exposed surface layer of machine parts, failure of components in some cases due to the lack of resistance to surface abrasion. One effective way of solving this problem is the development and implementation of advanced methods of surface hardening, based on the local impact of highly concentrated energy sources, subordinate to the principle of discrete hardening. The authors propose to use the method of discrete laser hardening. Studies have shown that this method of surface hardening reduces friction and improves wear resistance.**

Keywords: **laser heat treatment, discrete hardening, filling coefficient, friction coefficient, wear resistance.**

REFERENCES

1. Grigoriev S.N. Solution of problems of technological modernization of mechanical engineering [Resheniye zadach tekhnologicheskogo perevooruzheniya mashinostroyeniya], *Instrument – tekhnologiya – oborudovaniye [Tool – technology – equipment]*, 2008, no. 10, pp. 14-19. (in Russ.)

2. Grigoriev S.N., Smurov I.Y. Perspectives of development of innovative additive manufacturing in Russia and abroad [Perspektivy razvitiya innovatsionnogo additivnogo proizvodstva v Rossii i za rubezhom], *Innovatsii [Innovation]*, 2013, no. 10, pp. 2-8. (in Russ.)

3. Tarasova T., Nazarov A., Shalapko Yu. Abrasive and fretting wear resistance of refractory cobalt alloy specimens manufactured by the method of selective laser melting, *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol 35, no. 5, pp. 365-373.

4. Doubenskaia M., Pavlov M., Grigoriev S., Tikhonova E., Smurov I. Comprehensive optical monitoring of selective laser melting, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 236-243.

5. Andreev A.A., Volosova M.A., Gorban V.F. and at. The use of pulsed ion stimulation to modify the stressed structure and mechfnical properties of vacuum-arc TiN coatings, *Metallofizika I Noveishie Tekhnologii [Metal physics and advanced technology]*, 2013, vol. 35, pp. 953-963.

6. Potekhin B. A., Glushchenko A.N., Ilyushin V.V. Properties of babbit of the B83 brand [Svoystva babbita mapki B83], *Tekhnologiya metallov [Technology of metals]*, 2006, no. 3, pp. 17-22. (in Russ.)

7. Tarasova T.V., Gvozdeva G.O., Tikhonova E.P. Perspective of use a laser radiation for a surface treatment of nonferrous alloys [Perspektivy ispolzovaniya lazernogo izlucheniya dlya poverkhnostnoy obrabotki tsvetnykh splavov], *Vestnik MGTU Stankin [Bulletin of MGTU Stankin]*, 2012, no. 2, pp. 140-143. (in Russ.)

8. Alexandrov V.D. *Poverkhnostnoye uprochneniye alyuminiyevykh splavov* [Surface hardening of aluminum alloys], Moscow, Tekhpoligraftsentr, 2002, 337 p. (in Russ.)

9. Tarasova T.V. Perspective of use a laser radiation for increase of wear resistance corrosion-resistant steels [Perspektivy ispolzovaniya lazernogo izlucheniya dlya povysheniya iznosostoykosti korrozionnostoykikh staley], *Metallurgical science and heat treatment of metals [Metallurgy and heat treatment of metals]*, 2010, no. 6, pp. 54-58. (in Russ.)

10. Buryakin A.V. *Razrabotka tekhnologii lazernogo legirovaniya staley borom i azotom: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of technology of laser alloying with boron and nitrogen: abstract of the dissertation of PhD], Moscow, 1983, 17 p. (in Russ.)