

УДК 539.389:539.43:669.715

О ВЛИЯНИИ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16АТ*

*К.В. ЗАХАРЧЕНКО¹, аспирант
В.И. КАПУСТИН¹, канд. техн. наук, доцент
А.Ю. ЛАРИЧКИН², канд. физ.-мат. наук, м.н.с.
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 17 июня 2014
Рецензирование 17 июля 2014
Принята к печати 29 июля 2014

Захарченко К.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: Zaharchenkok@mail.ru

Значительная часть деталей машин в настоящее время в процессе производства подвергается различным технологическим воздействиям с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Одним из способов таких воздействий является формирование на поверхности изделия керамического покрытия. Керамическое покрытие имеет высокую износостойкость, низкий коэффициент трения, но неизвестны характеристики работоспособности покрытия в условиях, когда образец с покрытием подвержен знакопеременному нагружению. В работе предлагается методика для изучения закономерности неупругого деформирования структурно-неоднородных образцов металлического сплава Д16АТ при периодическом нагружении. Методика исследования включает в себя испытание по программе со ступенчато увеличивающимся напряжением в цикле и регистрацию эффектов неравновесного деформирования материалов. Исследование заключается в сравнительном анализе образцов с удаленным и модифицированным поверхностным слоем. Модифицированный слой формируется методом микродугового оксидирования (МДО), а удаление поверхностного слоя осуществляется методом химического травления в среде натриевой щелочи (15 % NaOH). Показано, что напряжения, при которых возникают необратимые явления у образцов с покрытием, выше на 20 %, чем у образцов с удаленным поверхностным слоем.

Ключевые слова: поверхностный слой, микродуговое оксидирование, упругопластическое деформирование, выносливость.

Введение

Известно, что зарождение и развитие усталостных трещин происходит в большинстве случаев в поверхностном слое образцов. Доказано, что поверхностные слои определяют первичное зарождение пластических сдвигов, в поверхностных слоях зарождаются трещины и протекает наиболее интенсивная пластическая деформация [1]. Причиной этого является неоднородность распределения напряжений по

сечению образца. Поверхностный слой, как самостоятельная подсистема, начинает работать при меньших напряжениях, чем основной слой материала.

Для повышения характеристик усталостной долговечности деталей машин используют различные способы модификации поверхностного слоя [2]. Например, для улучшения характеристик выносливости пластичных сплавов применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД), однако этот метод будет

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-08-31352.

эффективен только в том случае, если остаточные напряжения, обязательно сопровождающие процесс деформирования, не инициируют зарождение микротрещин на границе раздела упрочненного поверхностного слоя и основного материала. К тому же ППД не обеспечивает эффективную работу детали при неблагоприятно влияющих внешних факторах, таких как контактное трение, тепловая энергия, коррозионные среды.

Другим способом модификации поверхностного слоя является формирование на поверхности детали покрытия с заданными механическими свойствами. В настоящее время существует множество покрытий и способов их получения [3].

Одним из перспективных способов модификации поверхностного слоя является метод микродугового оксидирования (МДО) [4, 5]. Данная технологическая операция позволяет получить на поверхности образца слой, обладающий высокими механическими, трибологическими, адгезионными и антикоррозионными свойствами. Исследования механических свойств покрытия выполняются в основном отдельно от подложки [6]. Так как поверхностный слой и подложка работают как единое целое, то необходимо учитывать их взаимное влияние на деформационные характеристики структурно-неоднородных образцов.

В данной работе экспериментальное исследование проводится на примере перспективного керамического покрытия.

Отметим, что усталостные испытания структурно-неоднородных образцов с покрытиями показывают, что выносливость материала может как увеличиваться, так и уменьшаться [2]. Для оценки результатов влияние покрытия на механические и, в частности, усталостные свойства образца требуются ускоренные и малозатратные способы, прогнозирующие взаимодействие образца с покрытием в процессе периодического нагружения.

В настоящее время для определения характеристик выносливости деталей и образцов с покрытиями проводят разрушающие испытания на усталостную долговечность. Альтернативой разрушающим испытаниям на выносливость являются неразрушающие методы, основанные на регистрации предельной нагрузки по возникно-

ванию в образце необратимых изменений. Необратимые изменения в материале можно определять, например, по раскрытию петли гистерезиса [7], по диссипативному разогреву [8], изменению коэффициента поглощения [9] и другими способами. Следует подчеркнуть, что при определении характеристик неупругости часто используется одноосный подход. Однако эти способы не позволяют получить полное представление о деформированном состоянии материала. Они делают невозможным изучение явления упругопластического разрыхления [10] в процессе усталости и оценивание накопленной энергии, связанной с изменением деформированного состояния образца.

Таким образом, исследование изменения микродеформаций в режиме реального времени дает возможность для решения вопроса, связанного с определением перехода от упругопластического разрыхления материала к стадии распространения микротрещин.

Ставится задача продолжить разработку методики исследования, описанной в работе [11], позволяющей определять начало возникновения необратимых явлений и предел упругости при деформировании образцов с покрытием путем измерения трех компонентов тензора деформаций. Предел упругости позволяет получить информацию о необратимых процессах, происходящих в образце, на самых ранних стадиях периодического деформирования, а также определить кинетику процесса повреждения материала на стадии предразрушения и зарождения усталостных трещин.

Цель настоящей работы – изучить влияние керамического покрытия на закономерности неупругого деформирования при периодическом нагружении образцов из сплава Д16Т.

Методика, образцы, оборудование

Исследованы гладкие образцы прямоугольного сечения (рис. 1), изготовленные из листа алюминиевого сплава Д16АТ. Для получения однородных свойств по сечению рабочей части образцы подвергаются размерному химическому травлению. Удаляется лакирующий слой и часть основного материала. На рис. 1 показано расположение координатных осей X и Y , используемых при измерении деформаций рабочей части образца.

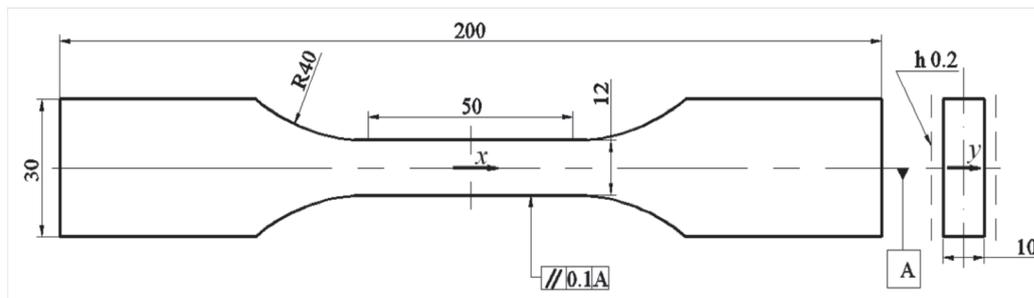


Рис. 1. Образцы для исследования

Поверхностный слой образцов представлен двумя вариантами.

1. Образец после травления. С поверхности образца методом размерного химического травления удалено около 350 мкм.

2. Образец с покрытием. На поверхности образца после травления сформировано керамическое покрытие толщиной 80 мкм.

При исследовании деформированного состояния образцов с поверхностным слоем полагают, что полные деформации образца определяются суммарным вкладом деформации поверхностного слоя и подложки. Удаление слоя материала с поверхности позволяет определить влияние этого слоя на сопротивление деформированию.

За эталон для сравнения в исследованиях принят образец со снятым поверхностным слоем. У такого эталонного образца поверхностный слой соответствует химическому составу, механическим свойствам и структуре подложки.

Для определения характеристик деформирования образцы испытывали на универсальной сервогидравлической испытательной машине Instron 8801. Измерения приращения компонентов тензора полных деформаций выполнено при помощи штатных экстензометров: №2620-601 «Dynamic Extensometer», «Transverse/Diametral Extensometer» №W-E-404-F.

В исследованиях деформированного состояния материала определялись относительные максимальные $\varepsilon_{x \max}$, $\varepsilon_{y \max}$ и минимальные $\varepsilon_{x \min}$, $\varepsilon_{y \min}$ деформации образца в цикле деформаций при периодическом нагружении по формулам

$$\varepsilon_x = (l_x - l_{0x}) / l_{0x}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = (b_y - b_{0y}) / b_{0y}, \quad (2)$$

где l_{0x} – база экстензометра продольных деформаций (равна 25 мм); $l_x - l_{0x}$ – изменение длины образца на базе экстензометра; b_{0y} – база экстензометра поперечных деформаций; $b_y - b_{0y}$ – изменение толщины рабочей части. База экстензометра поперечных деформаций для образцов первой партии определялась толщиной листа за вычетом травленного слоя ~ 9,3 мм, второй партии после нанесения покрытия ~ 9,5 мм.

При анализе массива экспериментальных данных определяется номер цикла гармонического нагружения, после этого в каждом цикле определяется максимальное и минимальное значение напряжения σ_{\max} и σ_{\min} , максимальное и минимальное значение продольной ($\varepsilon_{x \max}$, $\varepsilon_{x \min}$) и поперечной ($\varepsilon_{y \max}$, $\varepsilon_{y \min}$) деформаций. Таким образом, в цикле нагружения были известны порядковый номер цикла и два компонента деформации для каждого пикового значения напряжения в цикле.

Для разделения областей упругого (обратимого) и неупругого (упругопластического и необратимого) деформирования образец выводится из состояния термодинамического равновесия путем нагружения периодической нагрузкой со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения в цикле так, чтобы момент возникновения неравновесного состояния можно было обнаружить по изменению характеристик напряженно-деформированного состояния. В данной работе, так же как и в работе [12], под неравновесным состоянием материала понимается такое состояние, при котором активизируются диссипативные процессы.

Программа нагружений представляет собой последовательность блоков со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения. Каждый блок содержит 100 циклов нагружения по

гармоническому закону с частотой 1 Гц постоянной амплитуды и нулевым средним напряжением в цикле. Величина приращения амплитуды нагрузки для каждой ступени составляет 500 Н. Программа «Wave Matrix» обеспечивает нагружение по задаваемой программе испытаний, непрерывную запись показаний датчиков деформаций и нагрузки и формирование текстового файла. Число циклов в блоке нагружения определяется временем, необходимым системе образец-машина, для того чтобы выйти на режим.

Заметим, что поддержание амплитуды и формы цикла напряжений обеспечиваются системой автоматического управления испытательной машины Instron 8801 за счет регулирования давления в рабочем цилиндре. В области упругого деформирования давление в цилиндре и нагрузка на образец устанавливаются по одному и тому же закону, в данном случае – гармоническому. При переходе в область упругопластических

деформаций расход гидравлической жидкости в цилиндре возрастает тем больше, чем меньше сопротивление деформированию материала образца. Это приводит к тому, что кинетика процесса нагружения образца оказывается разной в упругой и неупругой областях деформирования.

На рис. 2, *a* представлена реализация программы испытаний образцов в координатах: по оси ординат – максимальное и минимальное напряжение в цикле; по оси абсцисс – число циклов нагружения. Фрагменты программы испытаний (рис. 2, *б, в*) приведены для иллюстрации того, что за 100 циклов система образец-машина выходит на установившийся режим нагружения.

Результаты и обсуждения

По программе, представленной на рис. 2, были испытаны образцы после травления и с покрытием. Результаты испытаний образцов представлены на рис. 3 в виде параметрических

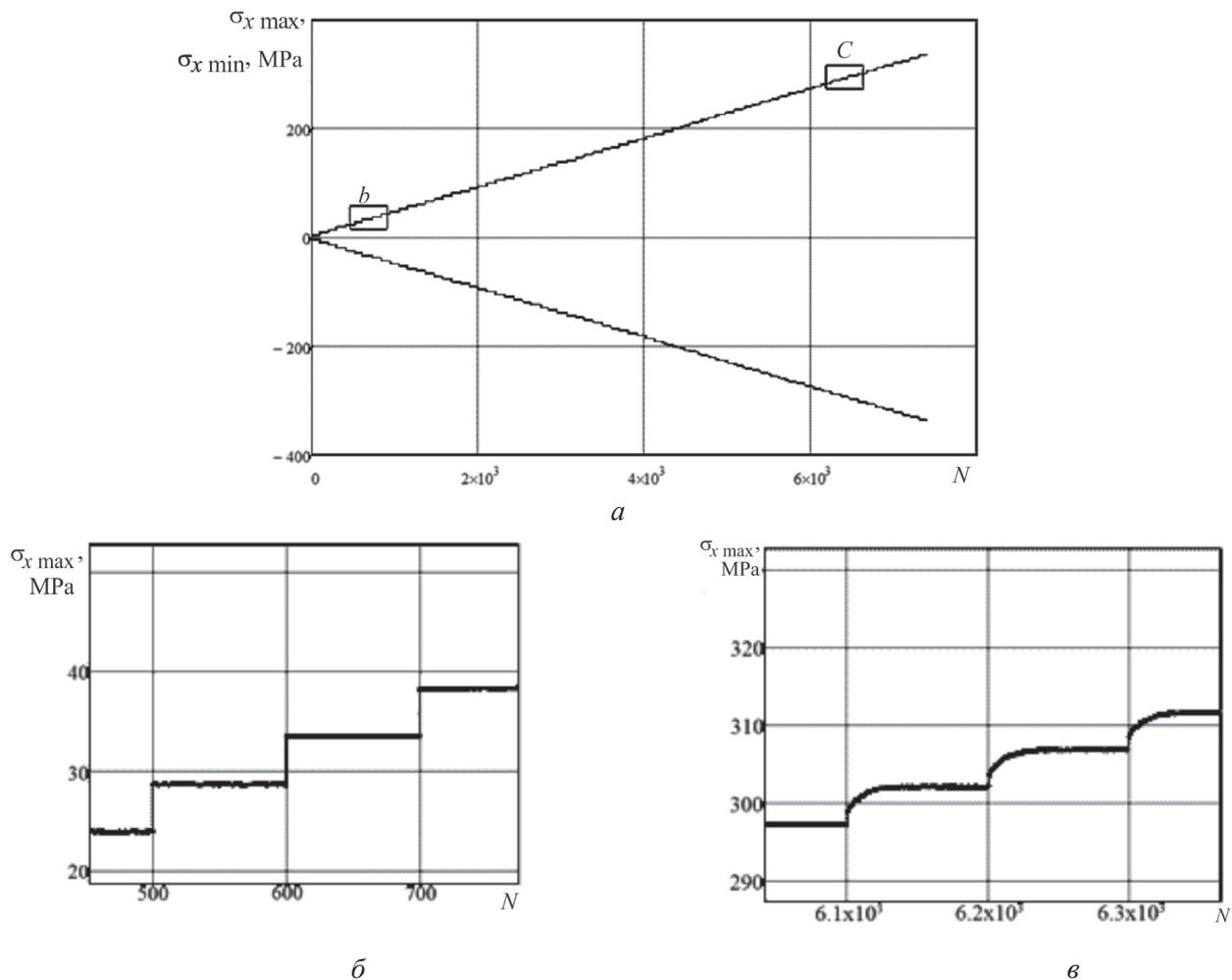


Рис. 2. Реализация программы нагружения образца ступенчато увеличивающейся нагрузкой (*a*). Фрагменты программы: в области упругого деформирования (*б*); в области малых упругопластических деформаций (*в*)

диаграмм, где в качестве параметра выступает число циклов нагружения. На рис. 3 цифрами 1 и 2 обозначены диаграммы деформирования образцов после травления и с покрытием соответственно.

Диаграммы построены в координатах: деформация $\varepsilon_{x \max}$, $\varepsilon_{y \max}$, $\varepsilon_{x \min}$, $\varepsilon_{y \min}$ – напряжение σ_{\max} , σ_{\min} (представленные пиковыми значениями). Индексы x и y соответствуют осям, указанным на рис. 1.

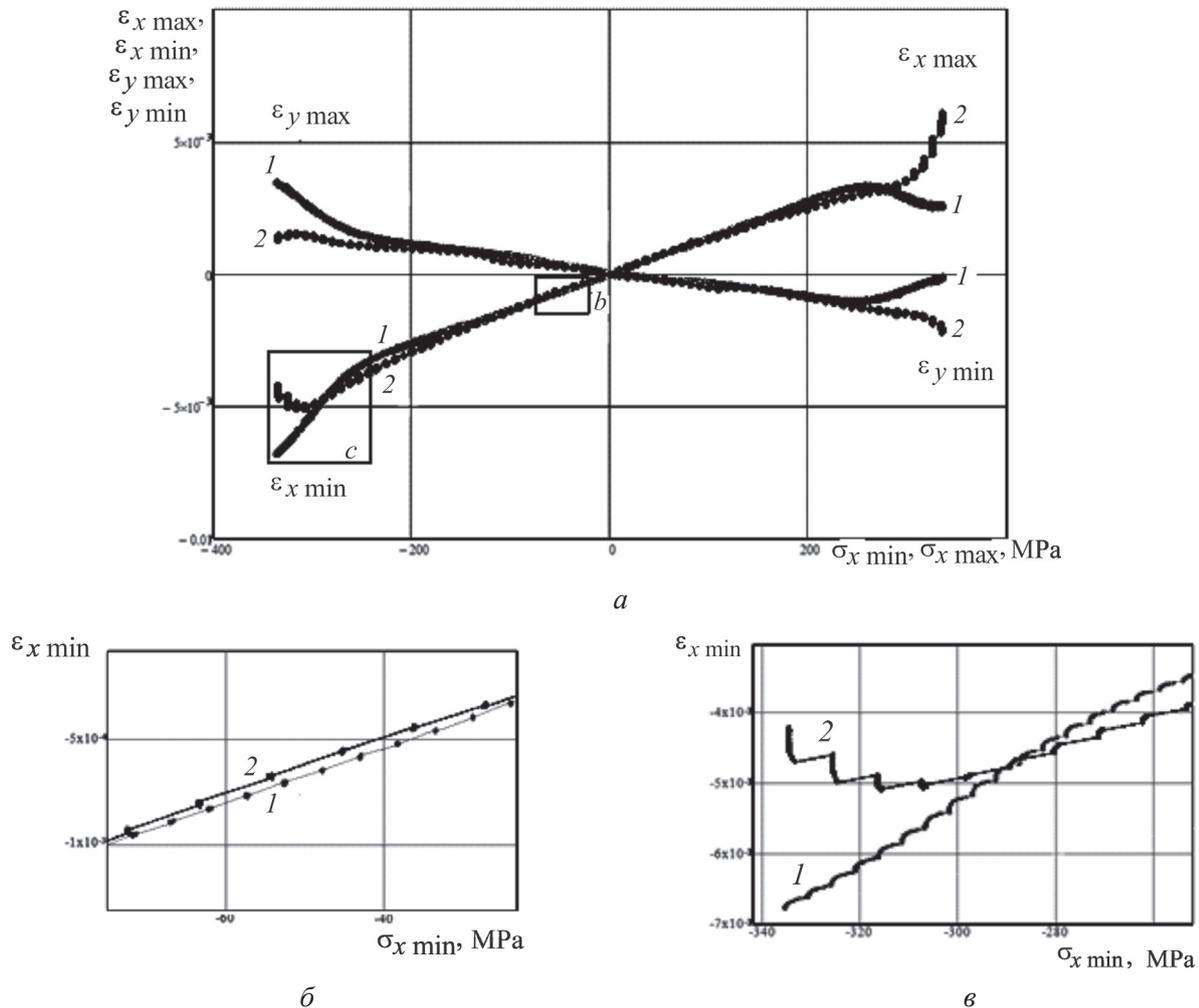


Рис. 3. Влияние микродугового оксидирования на закономерности деформирования (а). Фрагменты диаграмм: в упругой области (б), в области малых упругопластических деформаций (в)

На рис. 3, а можно выделить области упругого и неупругого деформирования.

В частности, из фрагмента, изображенного на рис. 3, б, видно, что диаграммы деформирования 1 и 2 в упругой области нагружения практически совпадают. В упругой области на каждой ступени нагружения деформации не меняются и проецируются в одну точку.

На фрагменте, представленном на рис. 3, в, показаны области неупругого деформирования образцов.

Образец без покрытия (кривая 1) при увеличении амплитуды от 250 МПа в области сжимающих напряжений имеет тенденцию к одностороннему накоплению поперечной и продольной деформации. Осевая пластическая

деформация материала, являясь следствием пластических сдвигов по одной из двух систем площадок главных касательных напряжений, приводит одновременно к укорочению и утолщению образца [13]. Это свидетельствует о том, что исследуемый образец материала (образец без покрытия) обладает более низкими характеристиками сопротивления деформированию при сжатии, чем при растяжении.

Для образца с покрытием (кривая 2, рис. 3, в) аналогичные зависимости продольных и поперечных деформаций от нагрузки свидетельствуют о смене механизма накопления деформаций и увеличении условного предела упругости структурно-неоднородного образца.

Анализ соотношений компонентов тензора напряжений эталонных образцов и с покрытием позволяет обнаружить, что при достижении критического напряжения (250 и 300 МПа соответственно) в материале активизируются процессы упругопластического разрыхления, которые сопровождаются изменением формы и объема рабочей части образца.

Как следует из рисунков, неупругое поведение образца с покрытием проявляет себя при амплитуде напряжений в цикле 300 МПа, а образца без покрытия – 250 МПа. Это показывает, что обработка поверхности алюминиевых образцов сплава Д16Т методом микродугового оксидирования оказывает упрочняющее влияние на их способность сопротивляться деформированию. Влияние керамического покрытия на деформационные свойства образцов оказывается настолько существенным, что меняет знак накопления деформаций в цикле нагружения на противоположный в отличие от образца без покрытия. Такое поведение объясняется значительно более высокими механическими свойствами покрытия, которое используется в качестве защитного слоя.

Таким образом, предлагаемый в работе методический подход к изучению неупругих характеристик образцов материала при периодическом нагружении позволяет:

1) учесть влияние поверхностного слоя образца на деформационные характеристики материала. Это достигается сравнительными исследованиями образцов с эталонной поверхностью, на которой практически отсутствуют остаточные напряжения, с образцами, имеющими модифицированную поверхность и неоднородную структуру;

2) определить путем ступенчатого увеличения амплитуды напряжения величину некоторого предельного напряжения, при которой активизируются процессы диссипации энергии в образце. Это в свою очередь позволяет охарактеризовать усталостные свойства образца материала, не доводя его до разрушения;

3) исследовать явления упругопластического разрыхления материала, связанные с изменением объема и формы в процессе периодического нагружения; накопления внутренней потенциальной энергии материала, которые дают возможность описывать природу усталостного разрушения.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая оценивать эффективность влияния технологического воздействия на поверхностный слой для увеличения сопротивления деформированию и выносливости материалов.

2. Экспериментально показано, что модификация поверхностного слоя путем микродугового оксидирования приводит к повышению сопротивления деформирования образца на 20 %.

Список литературы

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 7–26.

2. Конструктивная прочность композиции основной металл–покрытие / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.А. Столбов, В.И. Синдеев. – Новосибирск: Наука, 1996. – 296 с.

3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

4. Microstructure and properties of ceramic coatings produced on 2024 aluminum alloy by microarc oxidation / Wenbin Xue, Zhiwei Deng, Ruyi Chen, Tonghe Zhang, Hui Ma // Journal of Materials Science. – 2001. – Vol. 36, iss. 11. – P. 2615–2619.

5. Микродуговое оксидирование / Г.А. Марков, В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. – 1992. – № 1. – С. 34–56.

6. Мальшев В.Н. Оценка упрочнения алюминиевых сплавов микродуговой обработкой по результатам статических и динамических испытаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 131–137.

7. Troshchenko V.T. Fatigue and inelasticity of metals under nonuniform stressed state // Strength of Materials. – 2010. – Vol. 42, iss. 5. – P. 494–505.

8. Kapustin V.I., Gileta V.P., Tereshin E.A. On determination of elastic limits by dissipative heating of materials // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2010. – Vol. 51, iss. 3. – P. 393–397.

9. Си Дж.С. Мезомеханика взаимодействия энергии и массы в диссипативных системах // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 27–40.

10. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И., Рыбакина О.Г. Разрыхление и построение критерия прочности при сложном нагружении с учетом ползучести // Вопросы долговременной прочности энергетического оборудования. – Л.: НПО ЦКТИ, 1986. – С. 34–41. – (Труды ЦКТИ; вып. 230).

11. Капустин В.И., Гилета В.П., Захарченко В.М. Экспериментальное изучение закономерностей де-

формирования алюминиевых сплавов при регулярных нагрузениях // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 4 (53). – С. 40–43.

12. *Капустин В.И., Степанов В.М.* О связи между напряжениями и деформациями при периодических

нагружениях // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2006. – Т. 47, № 3. – С. 92–99.

13. *Пригожин И., Конденуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 37–44

About the influence of ceramic coatings on the stress-strain characteristics of the alloy Д16АТ (Al-Cu-Mg)

Zakharchenko K.V.¹, Post-graduate Student, e-mail: Zaharchenkok@mail.ru

Kapustin V.I.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: Fatigue.nstu@mail.ru

Larichkin A.Yu.², Ph.D. (Physics and Mathematics), Scientific associate, e-mail: larichking@gmail.com

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

Nowadays the most part of the machine elements is subjected to different technological effects on the stage of production. These effects are intended to improve the operational characteristics of the machine elements. One of such effect is the formation of the ceramic coating on the product surface. Ceramic coating has very high wear resistance, low coefficient of friction, but its operational characteristics in conditions when the sample with coating is subjected to loading with variable sign are unknown. The method of investigation of relationships of inelastic deformation of the samples with nonhomogeneous structure of metal alloy Д16АТ in conditions of periodic loading are suggested in the paper. The research methodology includes a step-stress test in the cycle, and registration of the effects of non-equilibrium strain. The study represents the comparative analysis of samples with removed and modified surface layer. Layer is modified by micro-arc oxidation (MAO) and removed by chemical etching in alkaline sodium hydroxide solution (15% NaOH). It is proved that the samples with coating demonstrate higher stress under which irreversible phenomena occur in comparison with the samples with removed surface layer. It is shown that the stress at which there are irreversible phenomena in coated specimens is 20% higher than that of the samples with a removed surface layer.

Keywords:

surface layer, micro-arc oxidation, elastic-plastic strain, fatigue resistance.

References

1. Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformiruemoe tverdoe telo kak nelineinoe ierarkhicheskii organizovannaya sistema [Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 7-26 (in Russian).
2. Tushinskii L.I., Plokhov A.V., Stolbov A.A., Sindeev V.I. *Konstruktivnaya prochnost' kompozitsii osnovnoi metall-pokrytie* [Constructive strength of basic metal-coating composition]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 296 p.
3. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 528 p.
4. Wenbin Xue, Zhiwei Deng, Ruyi Chen, Tonghe Zhang, Hui Ma. Microstructure and properties of ceramic coatings produced on 2024 aluminum alloy by microarc oxidation. *Journal of Materials Science*, 2001, vol. 36, iss. 11, pp. 2615-2619. doi: 10.1023/A:1017988024099

5. Markov G.A., Belevantsev V.I., Terleeva O.P., Shulepko E.K. Mikrodogovoe oksidirovanie [Microarc oxidation]. *Vestnik MGTU. Seriya «Mashinostroenie» – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 34-56.
6. Malyshev V.N. Otsenka uprochneniya alyuminiyevykh splavov mikrodogovoi obrabotkoi po rezul'tatam staticheskikh i dinamicheskikh ispytaniy [Evaluation of hardening aluminum alloys microarc treatment based on the results of static and dynamic tests]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of the Higher Education Institutions. Volga region. Engineering*, 2007, no. 3, pp. 131-137.
7. Troshchenko V.T. Fatigue and inelasticity of metals under nonuniform stressed state. *Strength of Materials*, 2010, vol. 42, iss. 5, pp. 494-505. doi: 10.1007/s11223-010-9241-1
8. Kapustin V.I., Gileta V.P., Tereshin E.A. On determination of elastic limits by dissipative heating of materials. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, vol. 51, iss. 3, pp. 393-397. doi: 10.1007/s10808-010-0053-7
9. Sih G.C. Mezomekhanika vzaimodeistviya energii i massy v dissipativnykh sistemakh [Mesomechanics of energy and mass interaction for dissipative systems]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2010, vol. 13, no. 5, pp. 27-40 (in Russian).
10. Novozhilov V.V., Kadashevich Yu.I., Rybakina O.G. [Loosening and construction of strength criterion under complex loading taking into account creep]. *Voprosy dolgovremennoi prochnosti energeticheskogo oborudovaniia. Trudy Tsentral'nogo kotloturbinnogo instituta imeni I.I. Polzunova* [Questions of long-term strength of the power equipment. Proceedings of the Central kotloturbinary institute of I.I. Polzunov], Leningrad, NPO TsKTI Publ., 1986, iss. 230, pp. 34-41.
11. Kapustin V.I., Gileta V.P., Zakharchenko V.M. Eksperimental'noe izuchenie zakonmernosti deformirovaniya alyuminiyevykh splavov pri regul'yarnykh nagruzheniyyakh [The experimental study of regularities of aluminum alloys deformation in case of regular stresses]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp. 40-43.
12. Kapustin V.I., Stepanov V.M. O svyazi mezhdou napryazheniyami i deformatsiyami pri periodicheskikh nagruzheniyyakh [Stress-strain relationship for periodic loading]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 92-99 (in Russian).
13. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. New York, Wiley, 1998. 508 p. (Russ. ed.: Kondepudi D., Prigozhin I. *Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigatelei do dissipativnykh struktur*. Moscow, Mir Publ., 2002. 461 p.).

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 14-08-31352.

Received 17 June 2014

Revised 17 July 2014

Accepted 29 July 2014