

УДК 669.14.018.24

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ ИЗ СТАЛИ ЭИ-347Ш

СИДОРЕНКО М. В. ^{1*}, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра деталей машин и подъёмно-транспортных механизмов, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (0617) 69-84-20, e-mail: sidorenko.mik@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

Аннотация. Подшипники авиационных двигателей нового поколения становятся все более сложными изделиями, к которым предъявляются высокие требования по обеспечению контактной выносливости, в том числе при повышенной температуре. Для повышения контактной выносливости применяют поверхностное пластическое деформирование (ППД). Одним из перспективных направлений ППД является упрочнение микрошариками. Большинство работ не учитывает влияние температуры на контактную выносливость деталей после ППД. **Цель.** Целью работы является повышение контактной выносливости стали ЭИ-347Ш за счет рационализации режимов упрочнения микрошариками. **Методика.** Испытания на контактную усталость проводились на установках МКВ-Т при температурах 20 °С и 300 °С. Все образцы перед упрочнением подвергались полировке. Для этого было специально разработано приспособление, которое обеспечивало постоянное давление на образец при полировании. Определены остаточные напряжения производили методом сверления глухого отверстия на образцах свидетелях. Для определения влияния давления рабочей жидкости на контактную выносливость были проведены испытания четырех партий образцов: в исходном состоянии и упрочненных в течении 3-х минут при давлении рабочей жидкости 0,16; 0,2; 0,25 МПа соответственно. **Результаты.** Выбранные режимы упрочнения приводят к увеличению шероховатости по сравнению с полированием примерно на один класс. Наименьшее изменение шероховатости наблюдается при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа. Глубина упрочненного слоя на всех режимах находится в пределах 0,08...0,1 мм. При давлении рабочей жидкости 0,16 МПа наблюдалось снижение микротвердости, которое связано с неустойчивостью процесса и неравномерностью упрочнения. Определены среднелогарифмическая долговечность и гарантированная долговечность, построены прямые, аппроксимирующие функции распределения логарифмов чисел циклов. Установлено, что наибольшая долговечность образцов получается при упрочнении при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа, что обусловлено благоприятным сочетанием величины остаточных напряжений, наклепа, микротвердости, которые получены при минимальном увеличении шероховатости. **Научная новизна.** Установлены закономерности влияния режимов упрочнения микрошариками на контактную выносливость стали ЭИ-347Ш. Применены более современные методики испытаний. **Практическая значимость.** Определены параметры упрочнения образцов из стали ЭИ-347Ш микрошариками, которые обеспечивают повышение долговечности при контактном нагружении. Это позволит рационально назначать режимы ППД при проектировании подшипников для перспективных газотурбинных двигателей. Усовершенствована методика испытаний, что позволило повысить достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: контактная выносливость, остаточные напряжения, упрочнение микрошариками, поверхностное пластическое деформирование.

ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВИТРИВАЛОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКІВ ІЗ СТАЛІ ЭИ-347Ш

СИДОРЕНКО М. В. ^{1*}, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра деталей машин і підйомно-транспортних механізмів, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (0617) 69-84-20, e-mail: sidorenko.mik@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

Анотація. Підшипники авіаційних двигунів нового покоління стають все більш складними виробами, до яких пред'являються високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, у тому числі при підвищеній температурі. Для підвищення контактної витривалості застосовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Одним з перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками. Більшість робіт не враховує вплив температури на контактну витривалість деталей після ППД. **Мета.** Метою роботи є підвищення контактної витривалості стали ЭИ-347Ш за рахунок раціоналізації режимів зміцнення мікрокульками. **Методика.** Випробування на контактну втому проводилися на установках МКВ-Т при температурах 20 °С і 300 °С. Всі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок при поліруванні. Визначення залишкових напружень проводили методом свердління глухого отвору на зразках свідках. Для визначення впливу тиску робочої рідини на контактну витривалість були проведені випробування чотирьох партій зразків: в початковому стані і зміцнених на протязі 3-х хвилин при тиску робочої рідини 0,16; 0,2; 0,25 МПа відповідно. **Результати.** Розглянуті режими зміцнення призводять до збільшення шорсткості в порівнянні з поліруванням приблизно на один клас. Найменша зміна шорсткості спостерігається при тиску робочої рідини 0,2 МПа. Глибина зміцненого шару на всіх режимах знаходиться в межах 0,08 ... 0,1 мм. При тиску робочої рідини 0,16 МПа спостерігалось зниження микротвердості, яке пов'язане з нестійкістю процесу і нерівномірністю зміцнення. Визначені

среднелогарифмічна довговічність та гарантована довговічність; побудовані прямі, що апроксимують функції розподілу логарифмів кількості циклів. Встановлено, що найбільша довговічність зразків має місце при зміцненні при тиску робочої рідини 0,2 МПа, що обумовлено сприятливим поєднанням величини залишкових напружень, наклепу, мікротвердості, які отримані при мінімальному збільшенні шерсткості. **Наукова новизна.** Встановлено закономірності впливу режимів зміцнення мікрокульками на контактну витривалість сталі ЭИ-347Ш. Застосовані більш сучасні методики випробувань. **Практична значимість.** Визначено параметри зміцнення зразків зі сталі ЭИ-347Ш мікрокульками, які забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Це дозволить раціонально призначати режими ППД при проектуванні підшипників для перспективних газотурбінних двигунів. Удосконалено методику випробувань, що дозволило підвищити достовірність отриманих результатів.

Ключові слова: контактна витривалість, залишкові напруження, зміцнення мікрокульками, поверхневе пластичне деформування.

INCREASING OF THE CONTACT FATIGUE OF BEARING COMPONENTS MADE OF STEEL EI-347SH

SIDORENKO M. V. ^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Department of machine parts and lifting and transport mechanisms, Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo str., Zaporozhye 69063, Ukraine, tel. +38 (0617) 69-84-20, e-mail: sidorenko.mik@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

Abstract. The new generation bearings of aircraft engines are becoming increasingly complex products, which meet high requirements for the contact fatigue, including one at elevated temperature. The surface plastic deformation (SPD) is used to increase the contact fatigue. One promising direction of SPD is micro-ball strengthening. The majority of works does not take into account the influence of temperature onto the contact fatigue of parts after SPD. **Purpose.** The aim of the study is to increase the contact endurance of steel EI-347SH through the rationalization of modes of micro-ball strengthening. **Methodology.** Contact fatigue tests were carried out with the setup MKV-T at temperatures of 20°C and 300°C. All the samples were polished before strengthening. For this purpose a special device, which ensures a constant pressure on the sample during polishing was designed. The determination of residual stresses was performed on surveillance samples by the blind hole drilling method. To determine the influence of fluid pressure on the contact endurance a group of tests was carried out on four batches of samples: the samples in the original state, the samples strengthened within 3 minutes at the working fluid pressure of 0.16 MPa and the same but with pressure of 0.2; 0.25 MPa respectively. **Findings.** Selected strengthening modes lead to an increasing of surface roughness for about one quality class if to compare to after-polishing state. The lowest change in surface roughness was observed with the working fluid pressure of 0.2 MPa. For all modes, the depth of the strengthened layer is in the range of 0.08 ... 0.1 mm. The decrease in microhardness, which is related to instability and unevenness of the strengthening process, was observed at the working fluid pressure of 0.16 MPa. The mean log durability and the guaranteed durability was determined; straight lines approximating the distribution functions of logarithms of numbers of cycles were built. It was found that the highest durability of the samples was obtained by strengthening mode with the working fluid pressure of 0.2 MPa that is caused by a favorable combination of levels of residual stresses, strain hardening, microhardness, in conjunction with a minimal increase in the surface roughness. **Originality.** Regularities of influence of the micro-balls strengthening modes on the steel EI-347SH contact endurance were defined. More advanced testing methods were applied. **Practical value.** The parameters of micro-ball strengthening that provide increased durability under contact loading for steel EI-347SH samples were determined. This enables one to assign the modes of SPD when designing the bearings for promising type of gas turbine engines more efficiently. The test procedure has been improved, resulting in improved reliability of the experimental results.

Keywords: contact fatigue, residual stresses, micro-ball strengthening, surface plastic deformation

Введение

Подшипники авиационных двигателей нового поколения становятся все более сложными изделиями, к которым предъявляются высокие требования по обеспечению контактной выносливости, в том числе при повышенной температуре. Современные тенденции направлены на создание подшипников интегрированных в конструкцию двигателя, гибридных опор, освоение новых теплостойких сталей, совершенствование технологии финишной обработки [3], [4]. Однако существующие способы финишной обработки не всегда позволяют достичь желаемой эффективности и производительности.

Для повышения контактной выносливости деталей подшипников применяется поверхностное

пластическое деформирование (ППД) [3], [11], [12], [13]. Для тонкостенных колец подшипников хорошие результаты обеспечивает ультразвуковое упрочнение [9]. Одним из перспективных направлений ППД является упрочнение микрошариками [2], [7], [8]. Вместе с тем большинство работ по контактной выносливости подшипниковых сталей не учитывает влияние температуры на долговечность деталей после ППД.

Цель

Целью работы является повышение контактной выносливости стали ЭИ-347Ш за счет рационализации режимов упрочнения микрошариками.

Материал и методика

Испытаниям подвергались образцы из стали ЭИ-347Ш (8Х4В9Ф2-Ш) ТУ 14-1-2244-2005, химический состав которой приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав материала ЭИ-347Ш / Chemical composition of the material

Содержание элементов, %							
C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V
0,78	0,26	0,27	4,57	0,15	8,64	0,25	1,55

Термообработка образцов производилась по стандартной технологии для сталей данного класса: закалка с охлаждением в масло и трехкратный отпуск. Для исследований отобраны образцы с твердостью после термообработки HRC 63...64. Все образцы перед упрочнением подвергались полировке. Для этого было специально разработано приспособление, которое обеспечивало постоянное давление на образец при полировании. Поверхностное пластическое деформирование осуществлялось способом гидродробеструйного упрочнения стальными микрошариками.

В связи с необходимостью проведения испытаний при температуре 300 °С смазка образцов производилась синтетическим маслом ВТ-301 (ТУ 38.101657-85).

Испытания на контактную усталость проводились на установках МКВ-Т при температурах 20 °С и 300 °С. Схема испытания заключается в обкатке испытуемого образца между двумя цилиндрическими испытательными дисками. Такая схема испытаний для подшипниковых сталей применяется Pratt & Whitney [5]. Режим испытаний: максимальные контактные напряжения – 4000 МПа, частота вращения образца – 29000 об/мин. Для предотвращения возможного проскальзывания была установлена система контроля частоты вращения ведущего и ведомого нажимных дисков лазерными тахометрами.

Определение остаточных напряжений производили методом сверления глухого отверстия [6] на образцах свидетелях на базе системы MTS3000 – Restan [10]. Высокая частота вращения алмазного сверла (300000 об/мин) позволяет пренебречь влиянием сверления на величину остаточных напряжений. Принимая во внимание твердость материала, были использованы обратноконусные алмазные сверла. Осмотр сверл под микроскопом после проведения измерений подтвердил правильность выбора инструмента.

Результаты исследования

Для определения влияния давления рабочей жидкости на контактную выносливость были проведены испытания восьми партий по 15 образцов: в исходном состоянии и упрочненных в течении 3-х

минут при давлении рабочей жидкости 0,16; 0,2; 0,25 МПа при температуре 20 °С и 300 °С соответственно.

Рассматриваемые режимы упрочнения приводят к увеличению шероховатости по сравнению с полированием примерно на один квалитет. Наименьшее изменение шероховатости наблюдается при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа.

Глубину наклепа определяли по распределению микротвердости поперечного сечения образца. Глубина упрочненного слоя при всех режимах обработки находится в пределах 0,08...0,1 мм. При давлении рабочей жидкости 0,16 МПа наблюдалось снижение микротвердости, которое, связано с неустойчивостью процесса и неравномерностью упрочнения.

Распределение остаточных напряжений по глубине образца показывает преимущества режимов упрочнения при давлении рабочей жидкости 0,2 и 0,25 МПа (рис. 1). Характер распределения соответствует данным полученным для ППД микрошариками [1], [8].

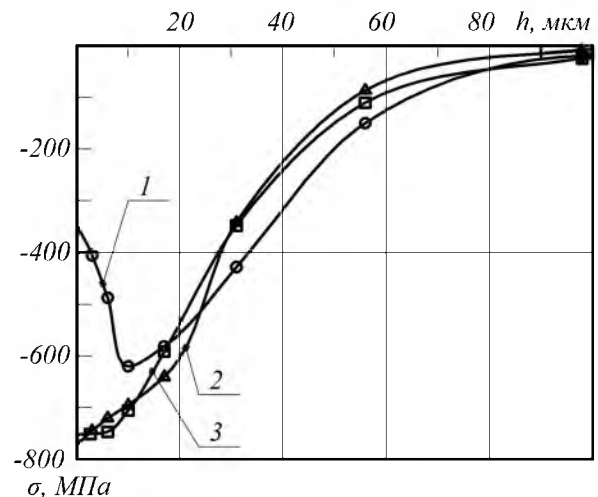


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений после обработки микрошариками:

1 – $p=0,16$ МПа; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа /
Residual stress distribution after micro-ball shot peening: 1 – $p=0,16$ МПа; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

Осмотр и контроль образцов до и после испытаний показал, что износ их рабочих поверхностей вследствие истирания практически отсутствовал. Основной причиной выхода из строя образцов как при температуре 20°С так и температуре 300°С была классическая усталость поверхностных слоев сопровождаемая появлением питтинга.

В результате статистической обработки были определены: среднелогарифмическая долговечность N_{50} , соответствующая 50% вероятности разрушения; гарантированная долговечность N_{10} , соответствующая 10% вероятности разрушения образцов, а также среднеквадратическое отклонение. По вычисленным значениям построены прямые, аппроксимирующие функции распределения логарифмов чисел циклов (рис. 2, 3).

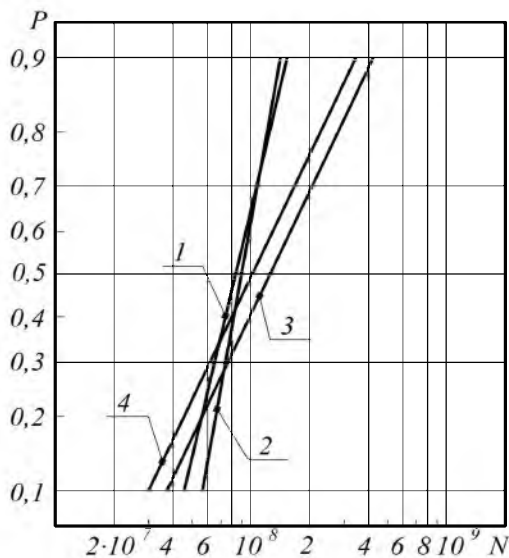


Рис. 2. Графики функций распределения долговечности образцов при температуре 20 °С: 1 – исходное состояние; 2 – $p=0,16$ МПа; 3 – $p=0,2$ МПа; 4 – $p=0,25$ МПа / Graphs of the samples lifetime distribution functions at the temperature of 20 °C: 1 – initial condition; 2 – $p=0,16$ МПа; 3 – $p=0,2$ МПа; 4 – $p=0,25$ МПа

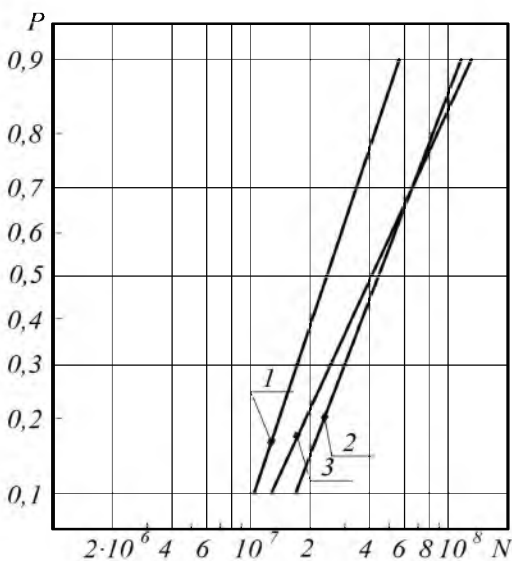


Рис. 3. Графики функций распределения долговечности образцов при температуре 300 °С: 1 – исходное состояние; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа; / Graphs of the samples lifetime distribution functions at the temperature of 300 °C: 1 – initial condition; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бочкарёв А. Г. Повышение работоспособности подшипников путем ультразвукового упрочнения внутренних колец несвязанными шариками / А. Г. Бочкарёв, автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Сам. гос. техн. ун-т. - Самара, 2005. - 19 с.
Bochkaryov, A. G. Povyshenie rabotosposobnosti podshpnikov putem ultrazvukovogo uprochneniya vnutrennih kolets nesvyazannyimi sharikami [Increase efficiency by

По результатам исследований установлено, что наибольшая долговечность образцов получается при упрочнении при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа, что обусловлено благоприятным сочетанием величины остаточных напряжений, наклепа, микротвердости, которые получены при минимальном увеличении шероховатости.

Научная новизна и практическая значимость

Установлены закономерности влияния режимов упрочнения микрошариками на контактную выносливость стали ЭИ-347Ш. Применены более современные методики испытаний.

Определены параметры упрочнения образцов из стали ЭИ-347Ш микрошариками, которые обеспечивают повышение долговечности при контактном нагружении. Это позволит рационально назначать режимы ППД при проектировании подшипников для перспективных газотурбинных двигателей. Усовершенствована методика испытаний, что позволило повысить достоверность полученных результатов.

Выводы

1. Показано, что упрочнение микрошариками является перспективным направлением ППД для деталей подшипников из стали ЭИ-347Ш, которое обеспечивает повышение контактной долговечности как при 20 °С, так и при 300 °С.
2. Установлены закономерности влияния режимов упрочнения микрошариками на контактную выносливость стали ЭИ-347Ш.
3. Определены параметры упрочнения образцов из стали ЭИ-347Ш микрошариками, которые обеспечивают повышение долговечности при контактном нагружении. Наибольшая долговечность образцов получается при упрочнении в течении 3-х минут при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа.
4. Получены закономерности распределения остаточных напряжений по глубине образцов из стали ЭИ-347Ш при различных режимах упрочнения микрошариками.

В дальнейших работах необходимо исследовать влияние на контактную выносливость длительности процесса упрочнения и материала микрошариков.

ultrasonic hardening bearing inner rings unrelated balls] Thesis (Ph.D.). SGTU, Samara. – 2013. – 19p.
<http://dlib.rsl.ru/viewer/01003009788#?page=1>

2. Гушин А.Ю. Определение параметров поверхностного слоя при упрочнении микрошариками / А.Ю. Гушин, Д.И. Волков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 11. – С. 12–14.

Guschin A.Yu., Volkov D.I. Opredelenie parametrov poverhnostnogo sloya pri uprochnenii mikrosharikami [Defining parameters of the surface layer by micro-balls

hardening] // Strengthening Technology and Coatings, 2006, no. 11, pp. 12-14.
http://www.mashin.ru/eshop/journals/uprochnyayuwie_tehnologii_i_pokrytiya/2006/11/

3. Критский В.Ю. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей / В.Ю. Критский, А.И. Зубко // Двигатель. – 2013. – №3(87). – С. 24-26.

Kritskiy V.Yu., Zubko A.I. Issledovanie vozmozhnosti ispolzovaniya keramicheskikh aviatsionnykh podshipnikov skolzheniya novogo pokoleniya v konstruktsiyah opor rotorov gazoturbinnyykh dvigateley [Study the possibility of using ceramic glade-bearings in the construction of new generation supports the rotors of gas-turbine engines]. Dvigatel – Engine, 2013, no. 3(87), pp. 24-26.

<http://engine.aviaport.ru/issues/87/pics/pg24.pdf>

4. Макачук В. ЕПК производит подшипники для авиационных двигателей последнего поколения. // Двигатель. – 2012. – № 1. – С.24 – 25.

Makarchuk V. EPK proizvodit podshipniki dlya aviatsionnykh dvigateley poslednego pokoleniya [EPK produces bearings for aircraft engines of the last generation.]. Dvigatel – Engine, 2012, no. 1, pp. 24-25.

<http://engine.aviaport.ru/issues/80/2012-1%20full.pdf>

5. Allison, B.D. Evolution of mechanical properties of M50 bearing steel due to rolling contact fatigueby. / B.D. Allison. – Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.). University of Florida. – 2013. – 149 p.

Allison, B.D. Evolution of mechanical properties of M50 bearing steel due to rolling contact fatigueby. Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.). University of Florida, 2013. 149 p.
<http://ufdc.ufl.edu/UFE0046077/00001>

6. ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the HoleDrilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. – 16 p.

ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the HoleDrilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. 16 p.
<http://www.astm.org/Standards/E837.htm>

7. Harada Y. Effect of Microshot Peening on Residual Stress of High-Toughness Spring Steel / Y. Harada, D. Gowa, T. Tsuji, Y. Kobayashi // Advanced Materials Research, Vol 325. – Aug. 2011. – pp. 745-750.

Harada Y., Gowa D., Tsuji T., Kobayashi Y. Effect of Microshot Peening on Residual Stress of High-Toughness Spring Steel // Advanced Materials Research, Vol 325, Aug. 2011, pp. 745-750.
<http://www.scientific.net/AMR.325.745>

8. Harada Y. Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel / Y. Harada, K. Fukaura,

S. Haga // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191. – Issues 1–3. – August 2007. – pp. 297–301.

Harada Y., Fukaura K., Haga S. Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, Issues 1–3, 1 August 2007, pp. 297–301.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607002610>

9. Kumar H., Singh S., Kumar P. Modified Shot Peening Process – A Review // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Vol. 5. – Issue 1. – Apr. 2013. – pp. 12-19.

Kumar H. Modified Shot Peening Process – A Review / H. Kumar, S. Singh, P. Kumar // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Vol. 5. – Issue 1. – Apr. 2013. – pp. 12-19.

http://www.ijeset.com/media/0001/3N9_IJESET911_v5_iss1_12to19.pdf

10. MTS3000 – Restan. Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling. - SINT Technology s.r.l., 2014. – 8 p.

MTS3000 – Restan. Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling. - SINT Technology s.r.l., 2014. 8 p.

http://www.sintechology.com/strain-gauge-measurements/RESTAN_MTS3000.html

11. Niku-Lari A. Advances in surface treatments. Technology – Applications – Effects – Vol.5 Pergamon Press, 1987, 522 p.

<http://www.amazon.com/Advances-Surface-Treatments-Technology-Applications/dp/1483130096>

12. Sang-Jae Yoon Fatigue life analysis of shot-peened bearing steel / Sang-Jae Yoon, Jung-Hoon Park, Nak-Sam Choi // Journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 26. – Issue 6. – June 2012. –pp. 1747-1752

Sang-Jae Yoon, Jung-Hoon Park, Nak-Sam Choi Fatigue life analysis of shot-peened bearing steel // Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, Issue 6, June 2012, pp. 1747-1752

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12206-012-0340-8>

13. Zaretsky E. V. Rolling Bearing Steels - A Technical and Historical Perspective, Part II / E. V. Zaretsky // Power Transmission Engineering, April 2013. – pp. 36-40.

Zaretsky E. V. Rolling Bearing Steels - A Technical and Historical Perspective, Part II // Power Transmission Engineering, April 2013, pp. 36-40.

<http://www.powertransmission.com/issues/0413/rolling-bearing-steels-2.pdf>

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром. техн. наук, проф. А. Я. Качаном (Украина); д-ром. техн. наук, проф. А. В. Овчинниковим (Украина)»

Поступила в редколлегию 21.03.2015

Принята к печати 24.03.2015