

УДК 621.78

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

© 2014 С.П. Мурзин¹, В.Б. Балякин¹, Л.В. Журавель²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва
(национальный исследовательский университет)

²Самарский государственный университет

Для улучшения трибологических свойств материалов находит применение лазерное микроструктурирование поверхности. Данное направление предполагает лазерное воздействие для создания на поверхности материала микроструктур с пространственной избирательностью физико-механических свойств, таких как: микротвёрдость, коэффициент трения и др. Перспективным является микроструктурирование поверхности торцовых газодинамических уплотнений из карбида кремния. Для повышения потенциала практического использования целесообразным является расширение функциональных возможностей лазерного микроструктурирования путём использования более распространённых лазерных установок с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне. Разработан метод модификации поверхностей деталей из карбида кремния лазерным воздействием с целью улучшения их трибологических свойств. Изучена структура материала в зоне термического влияния после лазерного микроструктурирования. Оценивались морфологические изменения обработанной поверхности после импульсно-периодического лазерного воздействия. Установлено, что лазерное импульсно-периодическое воздействие приводит к образованию на полированной поверхности детали из карбида кремния углублений круглой или овальной формы. Наряду с формированием неперриодического микрорельефа происходит модифицирование структуры поверхностного слоя детали. При лазерном воздействии на поверхности керамического материала имеет место разложение карбида кремния с образованием графита и твёрдого раствора углерода в кремнии. Предполагается выполнить исследования триботехнических свойств полученных структур.

Воздействие лазерное, модификация, материал, поверхность, микроструктурирование, деталь, улучшение, свойство.

Введение

Для улучшения трибологических свойств материалов находит применение метод лазерного микроструктурирования поверхности, на которую наносят специальные углубления, используемые для сбора частиц износа, а также для формирования слоя газовой или жидкой смазки. В статье рассматриваются углеродосодержащие материалы, которые имеют некоторые особенности структурной модификации поверхностного слоя. Данное направление предполагает лазерное воздействие для создания на поверхности материала микроструктур с пространственной избирательностью физико-механических свойств, таких как микротвёрдость, коэффициент трения и др. [1, 2]. Перспективным является микроструктурирование поверхностей деталей из карбида кремния облучением

поверхности короткими и ультракороткими импульсами лазерного излучения [3]. Например, в работе [4] осуществлено формирование периодически повторяющегося микрорельефа на торцовых кольцевых уплотнениях, обеспечивающего снижение потерь в паре трения «SiC-графит». В этом случае наиболее предпочтительной является обработка фемтосекундным излучением. При импульсном высокоэнергетическом воздействии с длительностью меньше времени термализации носителей заряда вещества реализуется процесс абляции материала с переходом в плазму и газообразную фазу, минуя жидкий расплав [6].

Торцовые газодинамические уплотнения являются одними из наиболее прогрессивных, поскольку соответствуют повышенным требованиям к надёжности,

обеспечивая достаточную герметичность [7]. Эффективность таких уплотнений, характеризующихся минимальной изнашиваемостью пары трения и малой утечкой, возрастает при увеличении скорости вращения ротора. Материалы уплотнений должны обладать размерной и структурной устойчивостью; достаточной прочностью и высокой теплопроводностью, а также химической стойкостью и газонепроницаемостью. Одними из наиболее прогрессивных материалов для изготовления торцовых газодинамических уплотнений являются электрографит с сурьмяной пропиткой и карбид кремния [8]. Применяются комбинации «SiC-графит», «WC-графит», для напряжённых условий работы уплотнения целесообразно использовать пару трения SiC-SiC. Снижение сухого трения при пуске и останове может достигаться путём нанесения тонкого слоя изнашиваемого графитового или алмазоподобного покрытия [9]. По сравнению с другими применяемыми для этих целей карбидами, SiC имеет большую теплопроводность, что предоставляет возможность меньшей инерционности при нестационарных тепловых процессах. Применение карбида кремния в уплотнительных кольцах обеспечивает меньший тепловой градиент, что позволяет минимизировать деформации при переходных режимах [10].

Различают два типа лазерного микроструктурирования: непосредственное формирование микрорельефа лазерным излучением [6] и синтез низкоразмерной периодической структуры в результате процессов самоорганизации, инициированных фемтосекундным лазерным излучением [11]. Для повышения потенциала практического использования целесообразным является расширение функциональных возможностей лазерного микроструктурирования путём использования более распространённых лазерных установок с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне [12-17]. Целью работы является определение

возможности модификации (микроструктурирования) поверхности деталей из карбида кремния лазерным импульсно-периодическим воздействием с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне для последующего улучшения их трибологических свойств.

Особенности формирования микрорельефа деталей из карбида кремния в результате воздействия сканирующим непрерывным лазерным излучением

Ведущие фирмы, специализирующиеся на производстве торцовых уплотнений, для создания газодинамического давления применяют плоские и ступенчатые канавки, глубины которых сравнимы с минимальной величиной зазора. Нанесение таких канавок проводится лазерным лучом по программе, обеспечивающей последовательную обработку каждой из канавок, находящихся на поверхности кольца. При этом управляющая программа также обеспечивает изменение мощности лазерного излучения по определенному закону, приводящему к изменению интенсивности испарения обрабатываемого материала в различных зонах обработки. К недостаткам этого метода обработки относят высокую стоимость обработки, невозможность обработки некоторых материалов с требуемой точностью, значительный разброс глубин канавок и в ряде случаев высокую шероховатость обработанной поверхности. При обработке материалов с высокой теплопроводностью, к которым относят SiC, наблюдаются наихудшие результаты по точности и воспроизводимости профиля канавок, наиболее выраженные на периферии пятна лазерного излучения. Определено, что наложение последовательных зон лазерного воздействия на материал приводит к формированию микрорельефа поверхности в виде последовательно чередующихся выступов и канавок. Изображение поверхности представлено на рис. 1.

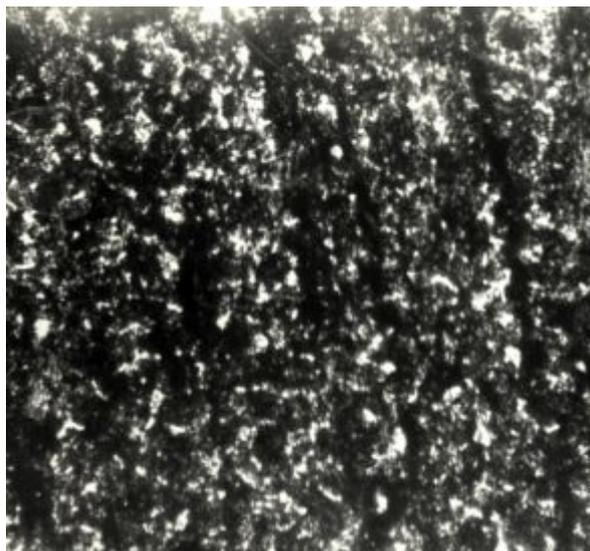


Рис. 1. Поверхность керамического материала, полученная в результате воздействия сканирующим непрерывным лазерным излучением, увелич. $\times 200$

Формирование микрорельефа деталей в результате воздействия сканирующим непрерывным лазерным излучением значительно снижает возможность последующего улучшения их трибологических свойств. В этом случае лазерную обработку целесообразно осуществить в несколько проходов в импульсно-периодическом режиме.

Характеристики технологической установки

Воздействие на образцы из карбида кремния осуществляли в импульсно-периодическом режиме на технологической установке ROFIN StarWeld Manual Performance, оснащенной Nd:ИАГ-лазером с длиной волны излучения 1,06 мкм. Основные технические характеристики установки ROFIN StarWeld: средняя мощность в импульсе 50 Вт; максимальная энергия в импульсе 100 Дж; длительность импульса 0,5...50 мс; частота следования импульсов 0,5...50 Гц; диаметр пятна 0,3...2,0 мм. Внешний вид установки ROFIN StarWeld представлен на рис. 2. Технологическая установка на базе лазера ROFIN StarWeld предоставляет возможность генерации импульсов различных форм, приведенных на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид технологической лазерной установки ROFIN StarWeld Manual Performance



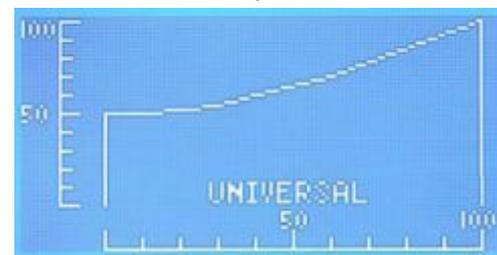
а



б



в



г

Рис. 3. Формы импульсов, реализуемых экспериментальной установкой на базе лазера ROFIN StarWeld: прямоугольная (а); «пиковая» с прямоугольным участком (б); с плавно убывающим фронтом (в); с плавно возрастающим фронтом (г)

Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

При обработке различных режимов лазерного воздействия энергия в импульсе составляла 0,9...1,1 Дж при длительности 0,5 мс и частоте следования импульсов 2,5 Гц. Использование «пиковой» с прямоугольным участком формы импульсов позволяет уменьшить время воздействия. На рис. 4 представлена исходная зернистая структура керамики на основе карбида кремния, полученная в результате горячего изостатического прессования, которое обеспечивает формирование устойчивой высокодисперсной структуры с повышенной плотностью, высокими значениями твердости и прочности. Оценивались морфологические изменения обработанной поверхности после импульсно-периодического лазерного воздействия, представленной на рис. 5.

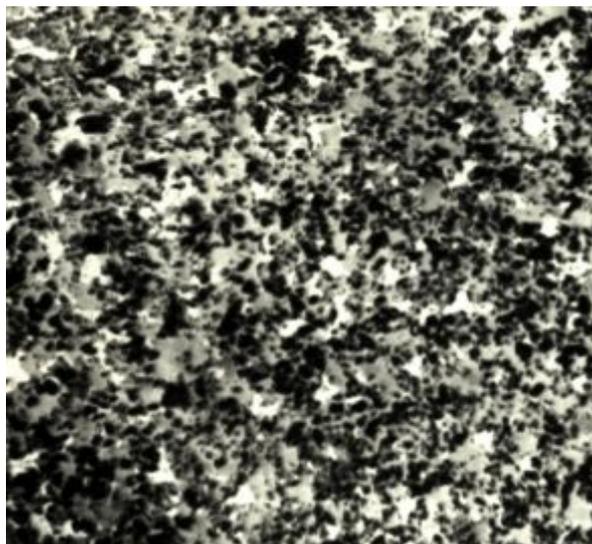


Рис. 4. Исходная зернистая структура керамики на основе карбида кремния, увелич. $\times 200$

Установлено, что лазерное импульсно-периодическое воздействие с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс приводит к образованию на полированной поверхности детали из карбида кремния углублений круглой диаметром до 30 мкм или овальной формы. Наряду с формированием неперiodического микро-рельефа происходит модифицирование

структуры поверхностного слоя детали. При лазерном воздействии на поверхности керамического материала имеет место разложение карбида кремния с образованием графита и твердого раствора углерода в кремнии. Предполагается выполнить исследования триботехнических свойств полученных структур с использованием трибометра TRB-S-DE фирмы CSM-Instruments.

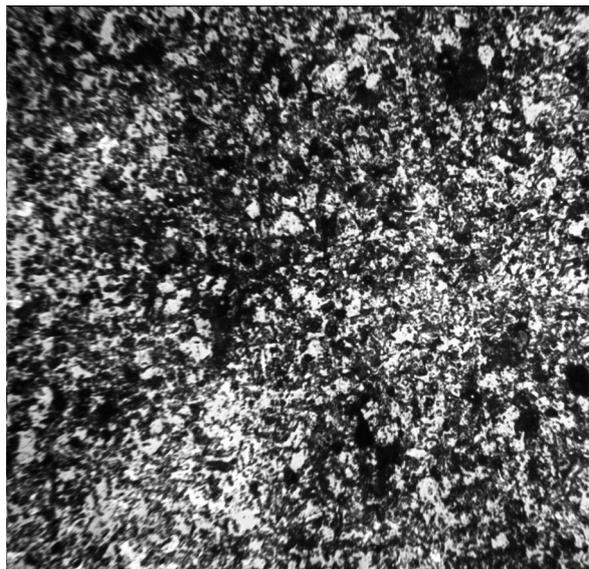


Рис. 5. Поверхность керамического материала, полученная в результате лазерного импульсно-периодического воздействия с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс, увелич. $\times 200$

Заключение

Перспективным для торцовых газодинамических уплотнений является использование пары трения SiC-SiC. Для снижения сухого трения при пуске и останове возможно нанести тонкий слой изнашиваемого графитового или алмазного покрытия. По сравнению с другими применяемыми для этих целей карбидами, SiC имеет большую теплопроводность, что предоставляет возможность меньшей инерционности при нестационарных тепловых процессах. Применение карбида кремния в уплотнительных кольцах обеспечивает меньший тепловой градиент, что позволяет минимизировать деформации при переходных режимах. Для улучшения

трибологических свойств материалов находит применение метод лазерного микроструктурирования поверхности, на которую наносят специальные углубления. Для повышения потенциала практического использования целесообразным является расширение функциональных возможностей лазерного микроструктурирования путём использования более распространённых лазерных установок с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне.

Осуществлено определение возможности модификации (микроструктурирования) поверхности деталей из карбида кремния лазерным импульсно-периодическим воздействием с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне на технологической установке ROFIN StarWeld Manual Performance, оснащённой Nd:ИАГ-лазером. Оценивались морфологические изменения обработанной поверх-

ности после импульсно-периодического лазерного воздействия. Установлено, что лазерное импульсно-периодическое воздействие с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс приводит к образованию на полированной поверхности детали из карбида кремния углублений круглой диаметром до 30 мкм или овальной формы. Наряду с формированием неперриодического микрорельефа происходит модифицирование структуры поверхностного слоя детали. При лазерном воздействии на поверхности керамического материала имеет место разложение карбида кремния с образованием графита и твёрдого раствора углерода в кремнии. Предполагается выполнить исследования триботехнических свойств полученных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

Библиографический список

1. Blatter A., Maillat M., Pimenov S.M., Shafeev G.A., Simakin A.V. Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats // *Tribology Letters*. 1998. V. 4, no. 3-4. P. 237-241.
2. Etsion I. State of the art in laser surface texturing // *Journal of Tribology*. 2005. V. 127, no. 1. P. 248-253.
3. Radek N., Pietraszek J., Antoszewski B. The average friction coefficient of laser textured surfaces of silicon carbide identified by RSM methodology // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 874. P. 29-34.
4. Yu X.Q., He S., Cai R.L. Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal surface // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 129, no. 1-3. P. 463-466.
6. Комленок М.С., Пименов С.М., Кононенко В.В., Конов В.И., Шайбе Х.-Й. Лазерное микроструктурирование поверхности сверхтвёрдых аморфных углеродных пленок // *Нано- и микросистемная техника*. 2008. № 3. С. 48-53.
7. Фалалеев С.В., Новиков Д.К., Балякин В.Б., Седов В.В. Торцовые газодинамические уплотнения. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. 300 с.
8. Фалалеев С.В. Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: основы теории и проектирования. М.: МАИ, 1998. 274 с.
9. Фалалеев С.В., Балякин В.Б., Новиков Д.К., Россеев Н.И., Медведев С.Д. Динамика «сухих» уплотнений // *Газовая промышленность*. 2001. № 10. С. 66-68.
10. Бондарчук П.В., Фалалеев С.В. Конструкция перспективного торцового газодинамического уплотнения опоры авиационного двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2011. № 2(26). С. 150-157.
11. Seifert G., Kaempfe M., Syrowatka F., Harnagea C., Hesse D., Graener H. Self-organized structure formation on the bottom of femtosecond laser ablation craters in glass // *Applied Physics A*. 2005. V. 81, no. 4. P. 799-803.

12. Murzin S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // *Journal of Advanced Materials*. 2003. V. 10, no. 2. P. 181-185.

13. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Осетров Е.Л., Никифоров А.М. Формирование нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12, № 4. С. 182-185.

14. Мурзин С.П. Разработка способов интенсификации формирования нанопористых структур металлических материалов селективной лазерной сублимацией компонентов сплавов // *Компьютерная оптика*. 2011. Т. 35, № 2. С. 175-179.

15. Мурзин С.П., Осетров Е.Л.,

Никифоров А.М. Сварка жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2008. Т. 10, № 3. С. 884-886.

16. Мурзин С.П., Меженин А.В., Осетров Е.Л. Расчёт температурных полей в конструкционных материалах в программном комплексе STAR-CD // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2008. Т. 10, № 3. С. 767-771.

17. Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Ключков С.Ю. Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения // *Компьютерная оптика*. 2005. № 28. С. 89-93.

Информация об авторах

Мурзин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, руководитель научно-образовательного центра лазерных систем и технологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: murzin@ssau.ru. Область научных интересов: лазерные технологии и нанотехнологии, лазерная физика и оптика.

Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой снов конструиро-

вания машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: balyakin@ssau.ru. Область научных интересов: проектирование опор роторов ГТД.

Журавель Леонид Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела и неравновесных систем, Самарский государственный университет. E-mail: sspc@samsu.ru. Область научных интересов: комплексные исследования структуры и физико-механических свойств конструкционных и функциональных материалов.

MODIFICATION OF THE SURFACE OF SILICON CARBIDE PARTS BY LASER TREATMENT FOR IMPROVING THEIR TRIBOLOGICAL PROPERTIES

© 2014 S.P. Murzin¹, V.B. Balyakin¹, L.V. Zhuravel²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Samara State University, Samara, Russian Federation

Laser microstructuring of the surface can be used for improving tribological properties of materials. This trend suggests a laser treatment to create on the material's surface microstructures with spatial selectivity of physical-mechanical properties, such as microhardness, friction factor, etc. The microstructuring of the external surface of gas-dynamic compactions is perspective. To increase the capacity of the practical use of it is expedient

to enhanced functionality through the use of laser microstructuring of the more common laser systems with pulse durations in the millisecond range. A method of surface's modification of silicon carbide details by laser treatment for improving their tribological properties has been developed. A material structure in the heat-affected zone after laser microstructuring has been studied. Evaluated the morphological changes of the treated surface after a repetitively pulsed laser exposure. It was established that the pulse-periodic laser exposure leads to the formation on the polished surface of the silicon carbide parts recesses are round to oval. Along with the formation of acyclic microrelief occurs modifying surface structure details. Under laser exposure on the surface of the ceramic material is a decomposition of silicon carbide and graphite to form a solid solution of carbon in silicon. Supposed to carry out the study of the tribological properties of the resulting structures.

Laser exposure, modification, material, surface, microstructuring, detail, improvement, property.

References

1. Blatter A., Maillat M., Pimenov S.M., Shafeev G.A., Simakin A.V. Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats // *Tribology Letters*. 1998. V. 4, no. 3-4. P. 237-241.
2. Etsion I. State of the art in laser surface texturing // *Journal of Tribology*. 2005. V. 127, no. 1. P. 248-253.
3. Radek N., Pietraszek J., Antoszewski B. The average friction coefficient of laser textured surfaces of silicon carbide identified by RSM methodology // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 874. P. 29-34.
4. Yu X.Q., He S., Cai R.L. Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal surface // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 129, no.1-3. P. 463-466.
6. Komlenok M.S., Pimenov S.M., Kononenko V.V., Konov V.I., Scheibe H.-J. Laser surface microstructuring of superhard amorphous Carbon films // *Journal of Nano and Microsystem technique*. 2008. No. 3. P. 48-53. (In Russ.)
7. Falaleev S.V., Novikov D.K., Balyakin V.B., Sedov V.V. *Torcovye gazodinamicheskie uplotnenija* [Mechanical gas dynamic seals]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2013. 300 p.
8. Falaleev S.V., Chegodaev D.E. *Torcovye beskontaktnye uplotnenija dvigatelej letatel'nyh apparatov: osnovy teorii i proektirovanija* [Mechanical seal proximity of aircraft engines: fundamentals of theory and design]. Moscow: MAI, 1998. 274 p.
9. Falaleev S.V., Balyakin V.B., Novikov D.K., Rosseev N.I., Medvedev S.D. Dynamics of the "dry" seals // *Gas Industry of Russia*. 2001. No. 10. P. 66-68. (In Russ.)
10. Bondarchuk P.V., Falaleev S.V. The design of long-term gas-dynamic mechanical seal support aircraft engine // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 2(26). P. 150-157. (In Russ.)
11. Seifert G., Kaempfe M., Syrowatka F., Harnagea C., Hesse D., Graener H. Self-organized structure formation on the bottom of femtosecond laser ablation craters in glass // *Applied Physics A*. 2005. V. 81. P. 799-803.
12. Murzin S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // *Journal of Advanced Materials*. 2003. V. 10, no. 2. P. 181-185.
13. Murzin S.P., Tregub V.I., Osetrov E.L., Nikiforov A.M. Formation of nanoporous structures of metallic materials cyclic elastic plastic deformation under laser exposure // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2010. V. 12, no. 4. P. 182-185. (In Russ.)
14. Murzin S.P. Developing ways of intensification of formation of nanoporous structures of metallic materials selective laser sublimation alloy components // *Computer Optics*. 2011. V. 35, no. 2. P. 175-179. (In Russ.)
15. Murzin S.P., Osetrov E.L., Nikiforov A.M. Welding of heat-resistant nickel-base alloys by pulsed laser radiation // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2008. V. 10, no. 3. P. 884-886. (In Russ.)
16. Murzin S.P., Mezhenin A.V., Osetrov E.L. Calculation of temperature fields in constructional materials in the program complex STAR-CD // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2008. V. 10, no. 3. P. 767-771. (In Russ.)

17. Kazanskiy N.L., Murzin S.P., Klotchkov S.Yu. Formation of the required power exposure in the laser materials processing using radiation focusators // Computer Optics. 2005. No. 28. P. 89-93. (In Russ.)

About the authors

Murzin Serguei Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems, Head of the Research & Education Center of Laser Systems and Technologies, Samara State Aerospace University. E-mail: murzin@ssau.ru. Area of Research: laser technology and nanotechnology, laser physics and optics.

Balyakin Valery Borisovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Elements of Mechanical

Design, Samara State Aerospace University. E-mail: balyakin@ssau.ru. Area of Research: design of gas turbine engine rotor supports.

Zhuravel Leonid Vasilyevich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Solid State Physics and Non-equilibrium Systems, Samara State University. E-mail: sspc@samsu.ru. Area of Research: comprehensive studies of the structure and physico-mechanical properties of structural and functional materials.