

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Мурзин С.П., Балякин В.Б., Мельников А.А., Васильев Н.Н., Лихтнер П.И.

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

### Аннотация

Лазерное микроstructuring поверхности находит применение при улучшении трибологических свойств материалов. Для повышения потенциала практического использования перспективным является расширение функциональных возможностей лазерного микроstructuring путём применения более распространённых лазерных установок с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне. Впервые определена возможность улучшения трибологических свойств поверхности керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне. Оценивались изменения морфологии обработанной поверхности после импульсно-периодического лазерного воздействия. Установлено, что импульсно-периодическая лазерная обработка с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс приводит к сглаживанию углублений на полированной поверхности керамики из карбида кремния. Более интенсивные режимы лазерной обработки приводят к образованию трещин на поверхности материала. Исследования трибологических свойств полученных структур показали, что среднее значение коэффициента трения поверхности после лазерной обработки снизилось на 15 %.

**Ключевые слова:** обработка лазерная, микроstructuring, материал керамический, карбид кремния, поверхность, коэффициент трения.

### Введение

Методы лазерного микроstructuring поверхности находят применение для улучшения трибологических свойств материалов [1–3]. Кроме синтеза низкоразмерной периодической структуры в результате инициированных фемтосекундным лазерным излучением процессов самоорганизации [4], применяют непосредственное формирование микрорельефа лазерным воздействием [5]. При этом обработку проводят излучением также с длительностью импульса в фемтосекундном диапазоне, осуществляя процесс абляции материала с переходом в плазму и газообразную фазу, минуя жидкий расплав. Воздействие ультракороткими импульсами лазерного излучения является эффективным для микроstructuring поверхности керамики из карбида кремния (SiC) [6] – одного из наиболее прогрессивных материалов для изготовления торцовых газодинамических уплотнений [7, 8]. По сравнению с другими применяемыми для этих целей карбидами, SiC имеет более высокую теплопроводность, что предоставляет возможность меньшей инерционности при нестационарных тепловых процессах. Применение карбида кремния в уплотнительных кольцах, обеспечивая меньший тепловой градиент, позволяет минимизировать деформации при переходных режимах [9]. Формирование периодически повторяющегося микрорельефа на кольцевых торцовых уплотнениях, который обеспечивает снижение потерь в паре трения «SiC-графит», осуществлено в работе [10]. Для повышения потенциала практического использования перспективным является расширение функциональных возможностей лазерного микроstructuring путём использования более распространённых лазерных установок с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне [11–16]. Применение оптических систем на основе элементов дифракционной компьютерной оптики [17–23] предос-

тавляет возможность проводить обработку областей требуемой геометрии.

Целью работы является определение возможности улучшения трибологических свойств поверхности керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне.

### 1. Формирование микрорельефа на керамике из карбида кремния воздействием сканирующего непрерывного лазерного излучения

При производстве торцовых уплотнений из керамических материалов на основе карбида кремния для создания газодинамического давления применяют нанесение плоских и ступенчатых канавок, глубины которых сравнимы с минимальной величиной зазора. Формирование таких канавок проводят непрерывным лазерным излучением по программе, обеспечивающей их последовательную обработку. Управляющая программа также обеспечивает изменение мощности лазерного излучения по определённому закону с возможностью изменения интенсивности испарения обрабатываемого материала на различных участках зоны обработки. К недостаткам данного метода, кроме высокой стоимости обработки, относят значительный разброс глубин канавок и высокую шероховатость обработанной поверхности. При обработке материалов с высокой теплопроводностью, к которым относят SiC, имеют место наихудшие результаты по точности и воспроизводимости профиля канавок, наиболее выраженные на периферии пятна лазерного излучения. Кроме того, последовательное наложение зон лазерного воздействия на материал приводит к формированию микрорельефа поверхности в виде чередующихся выступов и канавок. Изображение поверхности керамики из карбида кремния, полученное с использованием по-

ляризационно-оптического микроскопа Neophot-30, представлено на рис. 1. Формирование микрорельефа воздействием сканирующего непрерывного лазерного излучения значительно снижает возможность последующего улучшения их трибологических свойств. В этом случае лазерную обработку целесообразно осуществлять в импульсно-периодическом режиме.

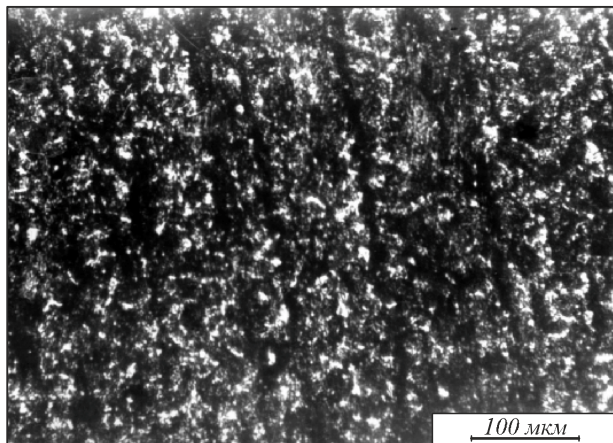


Рис. 1. Поверхность керамического материала, сформированная в результате воздействия сканирующего непрерывного лазерного излучения

### 2. Экспериментальное оборудование

Воздействие на образцы из керамического материала на основе карбида кремния осуществляли в импульсно-периодическом режиме на технологической лазерной установке ROFIN StarWeld Manual Performance, оснащённой Nd:YAG – лазером с длиной волны излучения 1,06 мкм. Основные технические характеристики установки: 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. Технологическая лазерная установка предоставляет возможность генерации импульсов различных форм: прямоугольной, «пиковой» с прямоугольным участком, с плавно убывающим фронтом, с плавно возрастающим фронтом. Исследования трибологических свойств полученных структур проводили с использованием трибометра TRB-S-DE, CSM Instruments, представленного на рис. 2.

### 3. Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Температурно-скоростные условия лазерной обработки были реализованы при длительности 0,5 мс и частоте следования импульсов 2,5 Гц. Энергия в импульсе составляла 0,9...1,1 Дж. Использование «пиковой» с прямоугольным участком формы импульсов позволило уменьшить время воздействия. Исследование морфологии поверхности керамического материала на основе карбида кремния осуществлялось с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\ SB, Tescan. На рис. 3 представлена исходная зернистая структура керамики на основе карбида кремния, полученная в результате механической обработки

после горячего изостатического прессования, которое обеспечивает формирование устойчивой высокодисперсной структуры с повышенной плотностью, высокими значениями твёрдости и прочности. При механической обработке в результате хрупкого разрушения происходит локальное выкрашивание частиц материала, образуются углубления неправильной формы размером 3...6 мкм с острыми краями.



Рис. 2. Внешний вид трибометра TRB-S-DE, CSM Instruments

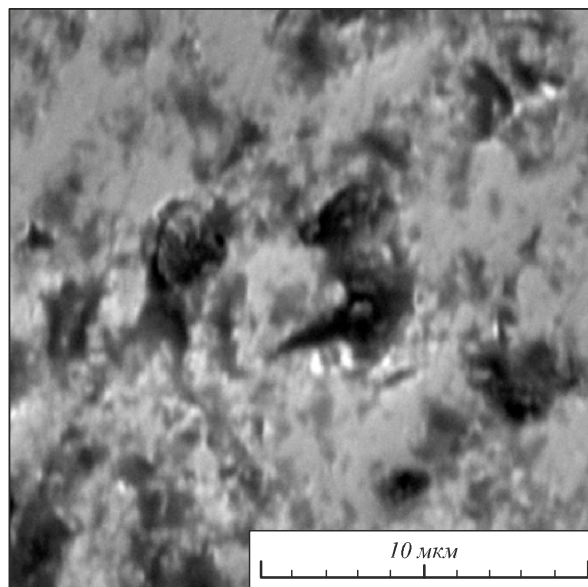


Рис. 3. Исходная зернистая структура керамики на основе карбида кремния

Оценивались изменения морфологии обработанной поверхности после импульсно-периодического лазерного воздействия. Изображение поверхности керамического материала на основе карбида кремния, полученной в результате лазерной обработки с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс, представлено на рис. 4. В результате металлографических исследований установлено, что импульсно-периодическая лазерная обработка с указанными параметрами режима приводит к сглаживанию углублений на полированной поверхности керамики из карбида кремния. Наряду с формированием неперiodического микрорельефа, происходило модифицирование структуры по-

верхностного слоя. При лазерном воздействии на поверхности керамического материала имело место разложение карбида кремния с образованием графита и твёрдого раствора углерода в кремнии.

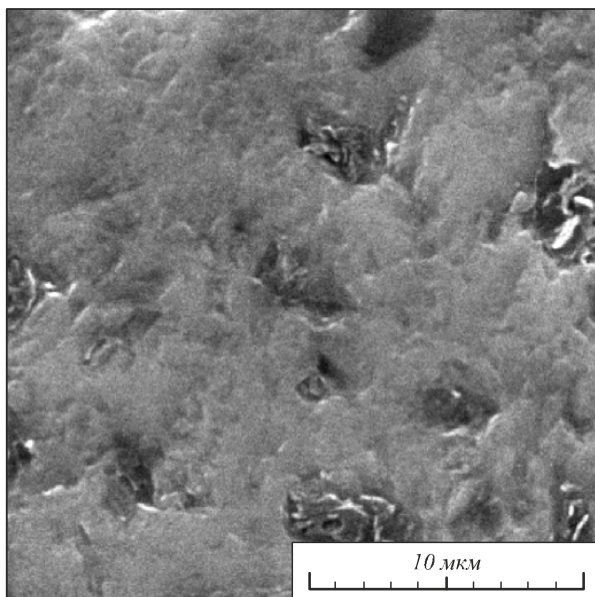


Рис. 4. Поверхность керамического материала на основе карбида кремния, полученная импульсно-периодической лазерной обработкой с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс

Более интенсивные режимы лазерной обработки приводят к образованию трещин на поверхности материала. При этом максимальный размер углублений увеличивается до 30 мкм. Морфология поверхности после импульсно-периодической лазерной обработки с энергией в импульсе 1,2 Дж представлена на рис. 5.

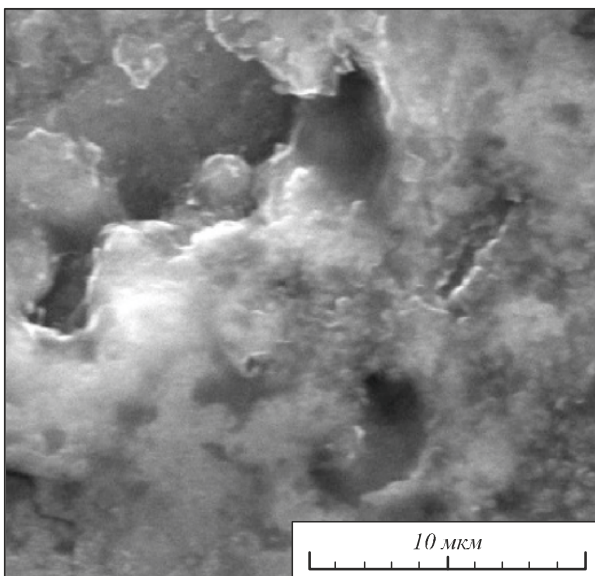


Рис. 5. Образование трещин на поверхности карбида кремния при интенсивных режимах

Коэффициент трения скольжения определяли за время 30 с при температуре окружающей среды 25°C и относительной влажности 63 % по схеме «шар–диск» при возвратно-поступательном движении, где

использовали шар диаметром 6 мм из нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ). В результате экспериментальных исследований установлено, что для исходной поверхности керамического материала на основе карбида кремния после горячего изостатического прессования и механической обработки максимальное значение коэффициента трения составило 0,068, а после импульсно-периодической лазерной обработки с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс уменьшилось до 0,058. Среднее значение коэффициента трения поверхности снизилось с 0,057 до 0,049 после лазерной обработки, т.е. на 15 %. Таким образом, определена возможность улучшения трибологических свойств керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой.

### Заключение

Впервые осуществлено определение возможности улучшения трибологических свойств поверхности керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой с длительностью импульса в миллисекундном диапазоне. Исследовалась исходная зернистая структура керамики, полученная в результате механической обработки после горячего изостатического прессования, которое обеспечивает формирование устойчивой высокодисперсной структуры с повышенной плотностью, высокими значениями твёрдости и прочности. Выявлено, что при механической обработке в результате хрупкого разрушения происходит локальное выкрашивание частиц материала, образуются углубления неправильной формы размером 3...6 мкм с острыми краями.

Оценивались изменения морфологии обработанной поверхности после импульсно-периодического лазерного воздействия. Установлено, что лазерная обработка с энергией в импульсе 1,1 Дж и длительностью импульса 0,5 мс приводит к сглаживанию углублений на полированной поверхности керамики из карбида кремния. Наряду с формированием неперидического микрорельефа, происходило модифицирование структуры поверхностного слоя. При лазерном воздействии на поверхности керамического материала имело место разложение карбида кремния с образованием графита и твёрдого раствора углерода в кремнии. Более интенсивные режимы лазерной обработки приводят к образованию трещин на поверхности материала. Исследования трибологических свойств полученных структур показали, что среднее значение коэффициента трения поверхности снизилось с 0,057 до 0,049 после лазерной обработки, т.е. на 15 %. Таким образом, определена возможность улучшения трибологических свойств керамики из карбида кремния импульсно-периодической лазерной обработкой, что позволит использовать данный метод при производстве торцовых газодинамических уплотнений. Целесообразно проведение дальнейших исследований триботехнических характеристик материала в зависимости от температуры, скорости скольжения и контактного давления.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией Лазерной оптики поверхности Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук С.М. Пименову за полезные обсуждения процессов лазерного текстурирования для улучшения трибологических свойств поверхностей.

**Литература**

1. **Blatter, A.** Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats // A. Blatter, M. Maillat, S.M. Pimenov, G.A. Shafeyev, A.V. Simakin // *Tribology Letters*. – 1998. – Vol. 4, Issue 3-4. – P. 237-241.
2. **Etsion, I.** State of the art in laser surface texturing / I. Etsion // *Journal of Tribology*. – 2005. – Vol. 127, Issue 1. – P. 248-253.
3. **Andersson, P.** Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces / P. Andersson, J. Koskinen, S. Varjus, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Georgiou, B. Zhmud, W. Buss // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, Issue 3-4. – P. 369-379.
4. **Seifert, G.** Self-organized structure formation on the bottom of femtosecond laser ablation craters in glass / G. Seifert, M. Kaempfe, F. Syrowatka, C. Harnagea, D. Hesse, H. Graener // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. – 2005. – Vol. 81, Issue 4. – P. 799-803.
5. **Groenendijk, M.** Microstructuring using femtosecond pulsed laser ablation / M. Groenendijk, J. Meijer // *Journal of Laser Applications*. – 2006. – Vol. 18, Issue 3. – P. 227-235.
6. **Radek, N.** The average friction coefficient of laser textured surfaces of silicon carbide identified by RSM methodology / N. Radek, J. Pietraszek, B. Antoszewski // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 11, Issue 9. – P. 337-343. – ISSN 1022-6680.
7. **Фалалеев, С.В.** Торцовые газодинамические уплотнения / С.В. Фалалеев, Д.К. Новиков, В.Б. Балякин, В.В. Седов. – Самара: СНЦ РАН, 2013. – 300 с.
8. **Фалалеев, С.В.** Динамика «сухих» уплотнений / С.В. Фалалеев, В.Б. Балякин, Д.К. Новиков, Н.И. Росшеев, С.Д. Медведев // *Газовая промышленность*. – 2001. – № 10. – С. 66-68. – ISSN 0016-5581.
9. **Falaleev, S.V.** Hydrodynamic characteristics of the face seal taking into account lubricant film breakdown, inertial forces and complex clearance form / S.V. Falaleev // *Life Science Journal*. – 2014. – Vol. 11, Issue 9. – P. 337-343. – ISSN 1097-8135.
10. **Yu, X.Q.** Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal surface / X.Q. Yu, S. He, R.L. Cai // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 129, Issue 1-3. – P. 463-466.
11. **Kazanskiy, N.L.** Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, Ye.L. Osetrov, V.I. Tregub // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2011. – Vol. 49, Issue 11. – P. 1264-1267.
12. **Murzin, S.P.** Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures / S.P. Murzin // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – Vol. 48. – P. 509-512.
13. **Мурзин, С.П.** Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 469-475. – ISSN 0134-2452.
14. **Мурзин, С.П.** Применение фокусаторов излучения для создания металлических нанопористых материалов с высокой удельной площадью поверхности лазерным воздействием / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.А. Мельников, Н.В. Трегуб // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 226-232. – ISSN 0134-2452.
15. **Мурзин, С.П.** Термоциклирование импульсно-периодическим лазерным воздействием для формирования нанопористой структуры в металлическом материале / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, Е.В. Шокова, Н.В. Трегуб // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 99-104.
16. **Мурзин, С.П.** Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии с применением фокусаторов излучения / С.П. Мурзин // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 249-255.
17. **Kazanskiy, N.L.** Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, Issue 10. – P. 3156-3166.
18. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. – 1995. – Vol. 101, Issue 2. – P. 37-41.
19. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // *Optics & Laser Technology*. – 2007. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1234-1238.
20. **Golovashkin, D.L.** Solving Diffractive Optics Problems using Graphics Processing Units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2011. – Vol. 20, Issue 2. – P. 85-89.
21. **Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58, Issue 9. – P. 748-760.
22. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики / Н.Л. Казанский // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4-1. – С. 54-62.
23. **Kazanskiy, N.** Binary beam splitter / N. Kazanskiy, R. Skidanov // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, Issue 14. – P. 2672-2677.

**References**

1. **Blatter, A.** Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats // A. Blatter, M. Maillat, S.M. Pimenov, G.A. Shafeyev, A.V. Simakin // *Tribology Letters*. – 1998. – Vol. 4, Issue 3-4. – P. 237-241.
2. **Etsion, I.** State of the art in laser surface texturing / I. Etsion // *Journal of Tribology*. – 2005. – Vol. 127, Issue 1. – P. 248-253.
3. **Andersson, P.** Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces / P. Andersson, J. Koskinen, S. Varjus, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Georgiou, B. Zhmud, W. Buss // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, Issue 3-4. – P. 369-379.
4. **Seifert, G.** Self-organized structure formation on the bottom of femtosecond laser ablation craters in glass / G. Seifert, M. Kaempfe, F. Syrowatka, C. Harnagea, D. Hesse, H. Graener // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. – 2005. – Vol. 81, Issue 4. – P. 799-803.
5. **Groenendijk, M.** Microstructuring using femtosecond pulsed laser ablation / M. Groenendijk, J. Meijer // *Journal of Laser Applications*. – 2006. – Vol. 18, Issue 3. – P. 227-235.
6. **Radek, N.** The average friction coefficient of laser textured surfaces of silicon carbide identified by RSM methodology / N. Radek, J. Pietraszek, B. Antoszewski // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 11, Issue 9. – P. 337-343. – ISSN 1022-6680.
7. **Falaleev, S.V.** Mechanical gas dynamic seals / S.V. Falaleev, D.K. Novikov, V.B. Balyakin, V.V. Sedov. – Samara: "Samara Scientific Center of RAS" Publisher, 2013. – 300 p. – (In Russian).

8. **Falaleev, S.V.** Dynamics of the “dry” seals / S.V. Falaleev, V.B. Balyakin, D.K. Novikov, N.I. Rosseev, S.D. Medvedev // *Gas Industry*. – 2001. – Vol. 10. – P. 66-68. – ISSN 0016-5581. – (In Russian).
9. **Falaleev, S.V.** Hydrodynamic characteristics of the face seal taking into account lubricant film breakdown, inertial forces and complex clearance form / S.V. Falaleev // *Life Science Journal*. – 2014. – Vol. 11, Issue 9. – P. 337-343. – ISSN 1097-8135.
10. **Yu, X.Q.** Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal surface / X.Q. Yu, S. He, R.L. Cai // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 129, Issue 1-3. – P. 463-466.
11. **Kazanskiy, N.L.** Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, Ye.L. Osetrov, V.I. Tregub // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2011. – Vol. 49, Issue 11. – P. 1264-1267.
12. **Murzin, S.P.** Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures / S.P. Murzin // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – Vol. 48. – P. 509-512.
13. **Murzin, S.P.** Method of composite nanomaterials synthesis under metal/oxide pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(3). – P. 469-475. – ISSN 0134-2452.
14. **Murzin, S.P.** Application of radiation focusators for creation of nanoporous metal materials with high specific surface area by laser action / S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.A. Melnikov, N.V. Tregub // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37(2). – P. 226-232. – ISSN 0134-2452.
15. **Murzin, S.P.** Thermocycling with pulse-periodic laser action for formation of nanoporous structure in metal material / S.P. Murzin, V.I. Tregub, E.V. Shokova, N.V. Tregub // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37(1). – P. 99-104.
16. **Murzin, S.P.** Synthesis of metal materials nanoporous structures with cyclic elasto-plastic deformation under laser treatment using radiation focusators / S.P. Murzin // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 249-255. – ISSN 0134-2452.
17. **Kazanskiy, N.L.** Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, Issue 10. – P. 3156-3166.
18. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. – 1995. – Vol. 101, Issue 2. – P. 37-41.
19. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // *Optics & Laser Technology*. – 2007. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1234-1238.
20. **Golovashkin, D.L.** Solving Diffractive Optics Problems using Graphics Processing Units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2011. – Vol. 20, Issue 2. – P. 85-89.
21. **Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58, Issue 9. – P. 748-760.
22. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8410. – P. 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.
23. **Kazanskiy, N.** Binary beam splitter / N. Kazanskiy, R. Skidanov // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, Issue 14. – P. 2672-2677.

## DETERMINING WAYS OF IMPROVING THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE SILICON CARBIDE CERAMIC USING A PULSE-PERIODIC LASER TREATMENT

*S.P. Murzin, V.B. Balyakin, A.A. Melnikov, N.N. Vasiliev, P.I. Lichtner  
Samara State Aerospace University*

### Abstract

Laser surface microstructuring is applied to improve the tribological properties of materials. To increase potential practical applications, the expansion of the laser microstructuring functionalities through the use of more common laser systems with pulse durations in the millisecond range may show promise. For the first time it was shown that the tribological properties of the surface of the silicon carbide ceramic can be improved using a pulse-periodic laser treatment with millisecond pulses. Morphological changes of the surface under treatment after the exposure to pulse-periodic laser light were assessed. It was found that the pulse-periodic laser treatment with 0.5-ms pulses of energy 1.1 J led to the smoothing of recesses in the polished surface of the silicon carbide ceramic. Higher-energy laser treatment led to the formation of cracks on the material surface. The study of tribological properties of the resulting structures showed that following the laser treatment the mean value of the friction coefficient decreased by 15 %.

*Keywords:* laser treatment, microstructuring, ceramic material, silicon carbide, surface, friction coefficient.

### Сведения об авторах

**Мурзин Сергей Петрович**, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ. Заместитель руководителя научно-образовательного центра лазерных систем и технологий СГАУ. С.П. Мурзин – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ С.П. Мурзина более 70 статей, 2 монографии, 18 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru).

**Serguei Petrovich Murzin** (b. 1963) graduated (1986) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara State Aerospace University – SSAU), majoring in Aircraft Engines. He received his Doctor in Tech-

atics (2005) degree from Samara State Aerospace University. He is holding a position of professor at SSAU's Power Plant Automatic Systems department. He is the deputy manager of the Research & Education Center of Laser systems and Technologies of SSAU. He is a specialist in laser technology and nanotechnology, laser physics and optics. He is co-author of more than 70 scientific papers, 2 monograph, and 18 inventions and patents.

**Балякин Валерий Борисович**, 1957 года рождения. В 1980 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2003 год), профессор, работает заведующим кафедрой основ конструирования машин Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: трибологические свойства материалов, демпфирование конструкций.

E-mail: [029-029@mail.ru](mailto:029-029@mail.ru).

**Valeriy Borisovich Balyakin** (b.1957) graduated (1980) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara State Aerospace University), majoring in Aircraft Engines. Doctor in Technics (2003), professor, currently he works as the head of Machine Design department of Samara State Aerospace University. Research interests: the tribological properties of materials, damping structures.

**Мельников Алексей Александрович**, 1951 года рождения, в 1974 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Обработка металлов давлением». Кандидат технических наук (1983 год), работает доцентом кафедры технологии металлов и авиаматериаловедения СГАУ. А.А. Мельников – специалист в области металловедения и порошковой металлургии. В списке научных работ А.А. Мельникова более 60 публикаций.

E-mail: [melnikov.alex@yandex.ru](mailto:melnikov.alex@yandex.ru).

**Alexey Alexandrovich Melnikov** (b. 1951) with honours graduated (1974) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara State Aerospace University – SSAU), majoring in Metal Processing and Metal Forming. He received his Candidate in Technics (1983) degree from Samara State Aerospace University. He is holding a position of associate professor at SSAU's Technology of Metals and Aircraft Material Science sub-department. He is a specialist in metal and powder technology. He is co-author of more than 60 scientific papers.

**Васильев Николай Николаевич**, 1994 года рождения, студент специальности «Лазерная техника и лазерные технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). Область научных интересов: лазерная обработка материалов.

E-mail: [nn.vasiliev@yandex.ru](mailto:nn.vasiliev@yandex.ru).

**Nikolai Nikolaevich Vasiliev** (b. 1994) student of Samara State Aerospace University (SSAU), Laser Equipment and Laser Technologies specialty. His research interest is laser material processing.

**Лихтнер Павел Иванович**, 1993 года рождения, студент специальности «Лазерная техника и лазерные технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). Область научных интересов: лазерная обработка материалов.

E-mail: [pi.lichtner@yandex.ru](mailto:pi.lichtner@yandex.ru).

**Pavel Ivanovich Lichtner** (b. 1993) student of Samara State Aerospace University (SSAU), Laser Equipment and Laser Technologies specialty. His research interest is laser material processing.

---

*Поступила в редакцию 11 ноября 2014 г.*