

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

С.П. Мурзин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

### Аннотация

Разработан метод формирования лазерным воздействием структур материалов деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок с повышением эксплуатационных свойств. Для осуществления энергетического воздействия при проведении экспериментальных исследований использовался газовый CO<sub>2</sub>-лазер ROFIN DC 010. Лазерное излучение было преобразовано с применением оптической системы, содержащей дифракционный оптический элемент – фокусатор излучения в световое пятно в виде отрезка с максимальной плотностью мощности излучения в его центре. Выполнены испытания на совместную деформацию покрытия и основы, а также определение прирабатываемости покрытия АНБ+НА-67 при врезаии контртела. Определено, что применение лазерной обработки подслоя предоставляет возможность увеличить угол изгиба в отсутствие образования трещин и отслоения покрытий. Это свидетельствует о более высокой прочности данного вида покрытий.

**Ключевые слова:** воздействие лазерное, система оптическая, материал, структура, покрытие, формирование.

**Цитирование:** Мурзин, С.П. Формирование структур материалов лазерным воздействием для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 353-359. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.

### Введение

Газотермическое плазменное напыление, одной из традиционных областей применения которого является авиадвигателестроение, с высокой экономической эффективностью применяется при изготовлении деталей [1–3]. В ряде случаев применение этого метода оказывается единственным возможным для обеспечения заданного ресурса и надёжности работы узла или агрегата. Однако практика напыления показывает, что плазменные покрытия являются чешуйчатыми, слоистыми, неоднородными в структурном и химическом отношении, характеризуются развитой поверхностью стыков между частицами, повышенным содержанием окисных включений, особенно по границам частиц, отдельных слоев и границе раздела между покрытием и основой [4–6]. Наиболее значимыми показателями качества покрытий являются адгезионная и когезионная прочность, характеризующие соответственно связь покрытия с основой и сцепление между частицами в покрытии и в основном определяющие надежность и долговечность напыленных покрытий. Адгезионная прочность наносимых покрытий, как правило, на порядок ниже прочности компактных материалов, поэтому адгезионно-когезионный механизм является преобладающим при отслоении и разрушении покрытий [7–9]. Анализ случаев разрушения покрытий в процессе их нанесения, при дальнейшей механической обработке, сборке, а также в период эксплуатации изделия показывает, что при определенных условиях процесса, которые могут появиться при серийном изготовлении изделий, имеют место различные дефекты плазменных покрытий: высокая пористость и другие виды несплошностей; образование микро- и макротрещин; выкрашивание покрытия на кромке изделия; отслоение покрытия при его нанесении и последующей обработке; отслоение покрытия при эксплуатации изделия; выкрашивание покрытия в термонагруженных местах, имеющее адгезионно-когезионный характер.

С целью повышения твердости, прочности сцепления и газонепроницаемости нанесенное на поверхность изделия покрытие может быть подвергнуто дополнительной термической обработке. Лазерная обработка нанесенных покрытий в этом случае предпочтительнее проплавления в газовой печи, плазменной струе или высокочастотным нагревом [10–12]. Поэтому лазерное оплавление может быть прогрессивным процессом для улучшения свойств напыленных покрытий на тяжелонагруженных участках поверхности, однако оно имеет свои характерные особенности, обусловленные локальностью действия и высокими плотностями мощности ( $q = 10^7 \dots 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>). Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки возможна только при условии создания определенного пространственного профиля интенсивности в требуемой области на поверхности детали. Однако, как правило, при выборе режимов обработки расчет распределения плотности мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты не проводят.

Для формирования лазерного излучения применяются различные оптические системы. Однако ни одна из них не может обеспечить одновременного сочетания таких свойств, как создание требуемого распределения мощности, концентрация всей энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и высокая надежность. Перспективно применение дифракционных оптических элементов – фокусаторов излучения [13–19]. Осуществляя выбранное на этапе их расчета преобразование лазерной энергии, такие оптические элементы предоставляют возможность сформировать заранее заданный профиль интенсивности излучения в фокальной плоскости. Применение фокусаторов излучения в технологии лазерной обработки материалов открывает принципиально новые возможности управления свойствами и

эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей [20–27].

Целью работы является формирование лазерным воздействием структур материалов для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении путём создания определенного пространственного профиля интенсивности в требуемой области на поверхности обработки с помощью дифракционных оптических элементов – фокусаторов излучения.

### ***1. Разработка метода формирования лазерным воздействием структур материалов для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении***

Практический интерес представляют исследования повышения эксплуатационных свойств деталей газотурбинных двигателей. С целью уменьшения радиальных зазоров газоздушного тракта газотурбинного двигателя применяют специальные срабатываемые уплотнительные покрытия из композиционных материалов типа «металл-твёрдый смазочный материал», имеющие высокую прочность и прирабатываемость одновременно. Находят применение относительно легкоплавкие покрытия Al-BN, а также материалы Ni-BN, X20H80-BN, X20H80-CaF<sub>2</sub>, как правило, наносимые на подслои из терморегулирующего никель-алюминиевого сплава. Покрытия, получаемые методом плазменного напыления, имеют гетерогенную структуру, основной причиной которой является различие в энергетическом состоянии частиц, участвующих в формировании покрытия, из-за неравномерности нагрева и ускорения по сечению плазменной струи. Структура слоя, сформированного за один проход, неоднородна и определяется различными размерами и энергетическим состоянием – температурой и скоростью частиц, находящихся в периферийной и центральной зоне двухфазного потока, состоящего из частиц и газа. Лишь частицы, проходящие через центр струи, нагреваются до состояния, достаточного для закрепления на основе. Кроме того, наблюдается также экранирующее действие периферийных частиц по отношению к частицам центральной зоны, поскольку периферийные частицы при движении плазматрона первыми ложатся на поверхность основы. Взаимодействие с атмосферой, адсорбция газов и оседание пылевидных фракций также ухудшают свойства межслойных границ.

Лазерная обработка с оплавлением предоставляет возможность обеспечить более равномерное распределение свойств в покрытиях при снижении крупномасштабной неоднородности [28]. Однако при этом имеет место существенное снижение пористости, что, как и при формировании чередующихся плотных и пористых зон в структуре уплотнительного материала, приводит к увеличению работы врезания, т.е. к ухудшению прирабатываемости.

Для повышения прочности сцепления покрытия с основой используют напыление промежуточных подслоев, например, интерметаллидного покрытия из терморегулирующего никель-алюминиевого сплава. Само-

связывающийся подслои под газотермические покрытия различного назначения на основе терморегулирующего никель-алюминиевого сплава превосходит по уровню сцепления известные покрытия из интерметаллидных порошков, поэтому применяется для деталей, не допускающих струйную обработку абразивом. Покрытие системы Ni-Al применяется также в качестве связки в композиционных покрытиях деталей для предохранения от газовой коррозии, имеет высокое сопротивление окислению, обладает высокой жаро- и термостойкостью при температуре 1323 К.

Особенностью плазменного напыления никель-алюминиевого сплава является повышенное тепловыделение, обусловленное протеканием экзотермической реакции образования алюминидов никеля. Выделение дополнительной энергии от экзотермической реакции возможно также при последующем термическом воздействии. В этом случае при лазерном воздействии происходит заплавление пор, трещин, осуществляется приварка покрытия и основы, что предоставляет возможность увеличения прочности сцепления.

Для получения высоких значений прочности сцепления покрытий при их хорошей прирабатываемости целесообразно лазерную обработку проводить после нанесения подслоя из никель-алюминиевого сплава перед напылением уплотнительного материала. Целесообразно разработать метод формирования лазерным воздействием структур материалов для повышения эксплуатационных свойств деталей в авиадвигателестроении. Отличительными особенностями разрабатываемого метода должно являться то, что в качестве основных параметров режима обработки рассматриваются форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения. С помощью оптических устройств формирования лазерных потоков создается требуемое распределение интенсивности лазерного излучения в зоне термического влияния.

Для осуществления энергетического воздействия при проведении экспериментальных исследований использовался газовый CO<sub>2</sub>-лазер ROFIN DC 010, выходная мощность которого имеет возможность плавного регулирования в пределах 100...1000 Вт, а исходный диаметр пучка с гауссовским распределением плотности мощности составляет 20 мм. Контроль температуры в зоне нагрева осуществлялся с помощью бесконтактного инфракрасного термометра «Кельвин-1300 ЛЦМ», имеющего диапазон измерения температур 300...1300°С. Лазерное излучение было преобразовано с применением оптической системы, содержащей дифракционный оптический элемент – фокусатор излучения в световое пятно в виде отрезка с максимальной плотностью мощности излучения в его центре.

### ***2. Срабатываемое покрытие статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя***

В качестве срабатываемого покрытия статора компрессора высокого давления газотурбинного дви-

гателя используется двухслойное покрытие: подслоя НА-67 (Ni + 67% Al) или НПА-80 (Ni + 80% Al) толщиной 0,1...0,5 мм и спецслоя АНБ (Al + 13...18% BN + 3...8% SiO<sub>2</sub>) толщиной 1,0...1,5 мм и пористостью  $P \approx 30\%$ . Материал на основе алюминия и нитрида бора гексагонального (до 25%) – АНБ имеет рабочую температуру до 450 °С, высокую истираемость и стабильные свойства.

Для изготовления высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей, работающих в интервале температур от минус 70 °С до 650 °С, применяют жаропрочные коррозионностойкие аустенитные сплавы на железоникелевой основе, упрочняемые при дисперсионном твердении. Эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью и имеют высокие механические свойства при повышенных температурах (600...650 °С). Основным недостатком, сдерживающим более широкое применение этих сплавов для деталей двигателей летательных аппаратов, является низкое сопротивление циклическим нагрузкам ( $\sigma_{-1}^{30} = 350...400$  МПа) и недостаточно высокий предел текучести ( $\sigma_{0,2}^{20} = 750...850$  МПа). Для обеспечения надежной работы деталей из жаропрочных сплавов на железоникелевой основе сплавы должны обладать высокой технологической пластичностью, хорошей свариваемостью, отсутствием чувствительности к концентраторам напряжений в условиях длительной эксплуатации при температурах до 650 °С. От хорошей свариваемости и технологичности сплава зависит возможность создания сложных силовых конструкций, а от более высокой прочности и жаропрочности в совокупности с нечувствительностью к концентраторам напряжений зависит надежность работы этих конструкций и, следовательно, их ресурс. Применяемый жаропрочный сплав на никелевой основе ЭП718-ВД (ХН45МВТЮБР-ВД) имеет невысокую пластичность ( $\delta = 10...12\%$ ) и недостаточно хорошую свариваемость (стойкость против образования горячих трещин при сварке  $A_{кр}$  составляет 1,5...1,6 мм/мин.).

Зарегистрированы случаи разрушения покрытий в период эксплуатации газотурбинного двигателя. В этом случае имеют место множественные очаги отслаивания срабатываемого покрытия от поверхности рабочего кольца статора компрессора высокого давления. Максимальный размер очага отслаивания составляет 30 мм. На лопатках I соплового аппарата, засоренных отслоившимися частицами покрытия вследствие недостаточно эффективного охлаждения, наблюдаются разгары и повышенное окисление материала лопаток. Разрушение покрытия классифицировано как связанное с комплексным воздействием ряда неблагоприятных факторов, таких как:

- низкая адгезионная и когезионная прочность подслоя и покрытия;
- низкая коррозионная стойкость, которая может быть обусловлена, например, высокой гигроскопичностью материала покрытия.

### 3. Исследование повышения эксплуатационных свойств лазерной обработкой деталей с интерметаллидным покрытием из терморегулирующего никель-алюминиевого сплава

Проведены предварительные исследования по выбору режимов лазерной обработки детали рабочего колеса статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя. Структура срабатываемого уплотнительного покрытия АНБ, нанесенного на подслоя из терморегулирующего сплава НА-67 после лазерной обработки, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура срабатываемого уплотнительного покрытия АНБ, нанесенного на подслоя из терморегулирующего сплава НА-67 после лазерной обработки, увеличение 170×: 1 – покрытие; 2 – подслоя; 3 – основа – материал ЭП-718-ВД

При двухстадийной обработке поверхности – напылении и последующем лазерном воздействии – лазерное воздействие предоставляет возможность дополнительно реализовать или завершить стадию развития объемного взаимодействия материала основы с материалом частиц покрытия. Термический цикл обработки лазером на 3-4 порядка больше времени взаимодействия частиц с подложкой при газотермическом способе нанесения покрытий, когда удар и деформация частиц приводят к их быстрой кристаллизации и охлаждению со скоростями, достигающими  $10^6...10^8$  К/с. При лазерной обработке время воздействия составляет не менее  $10^{-4}$  с, и на каждом элементарном участке поверхности контакта успевает произойти стадия активации контактных поверхностей с химическим взаимодействием материалов на границе раздела фаз. Использование полосового энергетического источника при лазерной обработке предоставляет возможность обеспечить снижение уровня остаточной напряженности в нанесенных покрытиях. При чередовании зон с различной интенсивностью обработки отсутствуют условия формирования сплошного слоя, который может быть более подвержен образованию сколов и трещин. В этом случае целесообразно осуществить более интенсивный нагрев центральной части зоны термического влияния.

При лазерном нагреве обрабатываемого материала, как и при перегреве частиц, заполнение контактной поверхности под частицей очагами схватывания может превышать 40...70%. Очаги схватывания, представ-

ляющие собой сварные участки небольшого размера, имеют высокую когезионную прочность, и разрушение их происходит с вырывом одного из соединяемых материалов, а не по границе частица-основа, частица-частица. Увеличением заполнения контактной поверхности под частицей очагами схватывания достигают повышения адгезионной и когезионной прочности покрытия. Проведение лазерного воздействия предоставляет возможность снизить пористость полученных покрытий, повысить коррозионную стойкость и износостойкость изделия. Регулирование пространственного распределения мощности лазерного излучения предоставляет возможность значительно повысить эффективность воздействия. Для газотермических покрытий, нанесённых на алюминиевые сплавы, имеющие высокую теплопроводность и невысокую температуру плавления, последующая лазерная обработка может оказаться недостаточно результативной вследствие интенсивного отвода тепла вглубь материала. Хромоникелевые сплавы имеют меньшую теплопроводность, что предоставляет возможность повысить эффективность лазерного воздействия.

Выполнены испытания на совместную деформацию покрытия и основы, а также определение прирабатываемости покрытия при врезании контртела. Для испытаний на совместную деформацию покрытия изготовлены образцы по традиционной технологии, с использованием комбинированной плазменно-лазерной обработки и с применением межоперационного лазерного нагрева напыляемой поверхности. При угле изгиба образцов первых двух групп до  $60^\circ$  отмечено образование трещин и отслоение покрытий, в большей степени характерные для образцов, выполненных с использованием комбинированной плазменно-лазерной обработки (рис. 2).

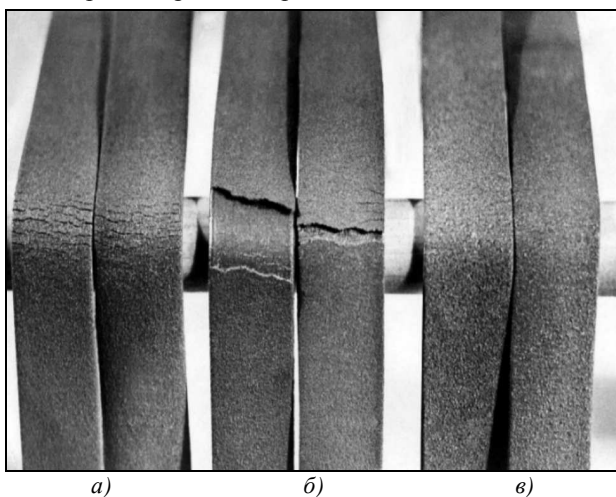


Рис. 2. Образцы после испытаний на совместную деформацию покрытия и основы, изготовленные: по традиционной технологии (а); с использованием комбинированной плазменно-лазерной обработки (б); газотермическим напылением с применением лазерной обработки подслоя (в)

Применение лазерной обработки подслоя предоставляет возможность увеличить угол изгиба до  $90^\circ$  в

отсутствие образования трещин и отслоения покрытий. Это свидетельствует о более высокой прочности данного вида покрытий. Определение прирабатываемости покрытия АНБ+НА-67 при врезании контртела проводилось на стандартном оборудовании при нагрузке:  $P = 10$  кг; угловая скорость вращения контртела:  $\omega = 8000$  об./мин.; продолжительность испытания:  $t = 10$  с.

Результаты испытаний на врезание покрытий, полученных с использованием лазерной обработки подслоя: хорошая прирабатываемость; нормальная выработка (1,0...1,2 мм); отсутствие сколов слоя; отсутствие значительного разогрева лопаток колеса. На рис. 3 представлен фрагмент рабочего кольца статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя с покрытием, нанесённым с использованием лазерной обработки подслоя.



Рис. 3. Фрагмент рабочего кольца статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя с уплотнительным покрытием, нанесённым с использованием лазерной обработки подслоя

### Заключение

Таким образом, с целью повышения твёрдости, прочности сцепления и газонепроницаемости нанесённое на поверхность изделия покрытие может быть подвергнуто дополнительной термической обработке. Лазерная обработка нанесённых методом газотермического плазменного напыления покрытий в этом случае предпочтительнее проплавления в газовой печи, плазменной струе или высокочастотным нагревом и может являться прогрессивным процессом для улучшения их свойств на тяжело нагруженных участках поверхности. Определено, что практический интерес представляют исследования повышения эксплуатационных свойств лазерной обработкой композиционных материалов с интерметаллидным покрытием из терморегулирующего никель-алюминиевого сплава в качестве подслоя. Лазерное воздействие предоставляет возможность дополнительно реализовать или завершить стадию развития объемного взаимодействия материала основы с материалом частиц покрытия. Происходит заплывание пор, трещин, осуществляется приварка покрытия и основы, что предоставляет возможность увеличения прочности сцепления, снижения пористости полученных покрытий, повышения коррозионной стойкости изделия.

Для уменьшения радиальных зазоров газоздушного тракта газотурбинных установок применяют специальные срабатываемые уплотнительные покрытия из композиционных материалов, имеющие высокую прочность и прирабатываемость одновременно, как правило, наносимые на подслоя из терморегулирующего сплава НА-67. Для получения высоких значений прочности сцепления покрытий при их хорошей прирабатываемости целесообразно лазерную обработку проводить после нанесения подслоя НА-67 перед напылением уплотнительного материала.

Разработан метод формирования лазерным воздействием структур материалов деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок с повышением эксплуатационных свойств. Отличительные от традиционных особенности разработанного метода следующие: требуемое распределение интенсивности лазерного излучения в зоне термического влияния обеспечивается при использовании оптических устройств формирования лазерных потоков, в качестве основных параметров режима обработки рассматриваются форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения. Проведены предварительные исследования по выбору режимов лазерной обработки детали рабочее кольцо статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя. Для осуществления энергетического воздействия при проведении экспериментальных исследований использовался газовый CO<sub>2</sub>-лазер ROFIN DC 010. Лазерное излучение было преобразовано с применением оптической системы, содержащей дифракционный оптический элемент – фокусатор излучения в световое пятно в виде отрезка с максимальной плотностью мощности излучения в его центре.

Выполнены испытания на совместную деформацию покрытия и основы, а также определение прирабатываемости покрытия АНБ+НА-67 при врезании контртела. Для испытаний на совместную деформацию покрытия изготовлены образцы по традиционной технологии, с использованием комбинированной плазменно-лазерной обработки и с применением межоперационного лазерного нагрева напыляемой поверхности. Определено, что применение лазерной обработки подслоя предоставляет возможность увеличить угол изгиба более, чем в 1,5 раза в отсутствие образования трещин и отслоения покрытий. Это свидетельствует о более высокой прочности данного вида покрытий. Результаты испытаний на врезание покрытий, полученных с использованием лазерной обработки подслоя: хорошая прирабатываемость; нормальная выработка; отсутствие сколов слоя; отсутствие значительного разогрева лопаток колеса.

#### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0131.

#### **Литература**

1. **Nylén, P.** Applications of thermal spray technology for aerospace and automotive industry / P. Nylén // In: Heat Treatment and Surface Engineering – Proceedings of Heat Treatment and Surface Engineering: HT & SE 2013, 16 to 18 May 2013 / S.R. Bakshi, M. Kamaraj, U.K. Mudali, T.S. Sudarshan, B. Raj, B.S. Murty, eds. – Chennai, India: Chennai Trade Centre, 2013. – P. 65-68.
2. **Tucker Jr., R.C.** Thermal spray coatings: Broad and growing applications / R.C. Tucker Jr. // International Journal of Powder Metallurgy. – 2002. – Vol. 38(7). – P. 45-53.
3. **Batra, U.** Thermal spray coating of abradable Ni based composite / U. Batra // Surface Engineering. – 2009. – Vol. 25(4). – P. 284-286. – DOI: 10.1179/174329407X215087.
4. **Molins, R.** Interlamellar boundary characterization in Ni-based alloy thermally sprayed coating / R. Molins, B. Normand, G. Rannou, B. Hannover, H. Liao // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 351(1-2). – P. 325-333. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00839-0.
5. **Wang, J.-H.** Microstructure of Ni-based self-fluxing alloy sprayed coating / J.-H. Wang, M. Friesel, M. Willander, R. Warren // Journal of Iron and Steel Research International. – 2005. – Vol. 12(2). – P. 56-59.
6. **Zhang, X.C.** Porosity and effective mechanical properties of plasma-sprayed Ni-based alloy coatings / X.C. Zhang, B.S. Xu, F.Z. Xuan, S.T. Tu, H.D. Wang, Y.X. Wu // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255(8). – P. 4362-4371. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.10.120.
7. **Revun, S.A.** Peculiarities of adhesion bond formation under gas-thermal coatings spraying / S.A. Revun, V.F. Balakirev // Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov. – 2002. – No. 2. – P. 55-62.
8. **Jin, Y.** Process optimization of plasma spraying Ni-based alloy coating / Y. Jin, Z. Qian, C. Wang, J. Yue, K. Li // Heat Treatment of Metals. – 2013. – Vol. 38(4). – P. 104-108.
9. **Kromer, R.** Laser surface patterning to enhance adhesion of plasma sprayed coatings / R. Kromer, S. Costil, J. Cormier, D. Courapied, L. Berthe, P. Peyre, M. Boustie // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 278. – P. 171-182. – DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.07.022.
10. **Skulev, H.** Modifications of phases, microstructure and hardness of Ni-based alloy plasma coatings due to thermal treatment / H. Skulev, S. Malinov, P.A.M. Basheer, W. Sha // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 185(1). – P. 18-29. – DOI:10.1016/j.surfcoat.2003.12.012.
11. **Liu, F.** Ni-based alloy cladding on copper crystallizer surface by laser / F. Liu, C.-S. Liu, X.-Q. Tao, S.-Y. Chen // Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University. – 2006. – Vol. 27(10). – P. 1106-1109.
12. **Felgueroso, D.** Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings / D. Felgueroso, R. Vijande, J.M. Cuertos, R. Tucho, A. Hernández // Wear. – 2008. – Vol. 264(4). – P. 257-263. – DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.015.
13. **Doskolovich, L.L.** Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 311-322. – DOI: 10.1016/0143-8166(91)90018-0.
14. **Kazanskiy, N.L.** Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33 (10). – P. 3156-3166. – DOI: 10.1117/12.178898.
15. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433. – DOI: 10.1080/09500349608232815.
16. **Doskolovich, L.L.** Design of DOEs for wavelength division and focusing / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, P. Perlo, P. Repetto // Journal of Modern

- Optics. – 2005. – Vol. 52(6). – P. 917-926. – DOI: 10.1080/09500340512331313953.
17. **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(6). – P. 1234-1238. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
  18. **Kazanskiy, N.L.** Research and education center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2012. – V. 8410. – 84100R-1. – DOI: 10.1117/12.923233.
  19. **Golovashkin, D.L.** Solving diffractive optics problem using graphics processing units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20(2). – P. 85-89. – DOI: 10.3103/S1060992X11020019.
  20. **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(11). – P. 1264-1267. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.07.001.
  21. **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. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.11.031.
  22. **Murzin, S.P.** Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.03.022.
  23. **Murzin, S.P.** Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 33(1-3). – P. 67-76.
  24. **Smelov, V.G.** Particularly selective sintering of metal powders by pulsed laser radiation / V.G. Smelov, A.V. Sotov, S.P. Murzin // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 403-407. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.403.
  25. **Abulkhanov, S.R.** Technologies of laser radiation focusators / S.R. Abulkhanov // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9(11). – P. 834-842. – DOI: 10.3923/rjasci.2014.834.842.
  26. **Мурзин, С.П.** Разработка способов интенсификации формирования нанопористых структур металлических материалов селективной лазерной сублимацией компонентов сплавов / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 175-179.
  27. **Мурзин, С.П.** Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 469-475.
  28. **Мурзин, С.П.** Применение фокусаторов излучения для повышения эффективности лазерной термической и комбинированной обработки материалов / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 114-120.
  29. **Мурзин, С.П.** Разработка технологического метода повышения эксплуатационных характеристик деталей лазерной обработкой и определение требований к применению фокусаторов излучения / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2006. – Т. 30. – С. 44-48.

#### Сведения об авторе

**Мурзин Сергей Петрович**, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет, коротко – Самарский университет) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета. Руководитель научно-образовательного центра лазерных систем и технологий. 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).

ГРНТИ: 29.33.47

Поступила в редакцию 1 июня 2016г. Окончательный вариант – 16 июня 2016 г.

## FORMATION OF STRUCTURES IN MATERIALS BY LASER TREATMENT TO ENHANCE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT ENGINE PARTS

S.P. Murzin

Samara National Research University, Samara, Russia

### Abstract

We proposed a method of the formation of structures in materials by laser treatment aimed to enhance the performance characteristics of aircraft engine parts. The experimental study was conducted using a high-power gas CO<sub>2</sub> laser *ROFIN DC 010*. Using an optical system comprising a focusing diffractive optical element, the laser beam was focused into a focal line with the maximum power density in its center. Tests on the joint deformation of the coating and substrate were conducted. We also determined the running-in ability of the *ANB + NA-67* coating following the cut-in of an opposite element. It was found that the laser treatment of the sublayer enabled the bending angle to be increased while avoiding cracking and delamination of the coating.

**Keywords:** laser treatment, optical system, material, structure, coating, formation.

**Citation:** Murzin SP. Formation of structures in materials by laser treatment to enhance the performance characteristics of aircraft engine parts. Computer Optics 2016; 40(3): 353-59. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-353-359.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the Program "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020" within the project RFMEFI57815X0131.

### References

- [1] Nylén P. Applications of thermal spray technology for aerospace and automotive industry. Heat Treatment and Surface Engineering – Proceedings of Heat Treatment and Surface Engineering 2013; Chennai, India: 65-68.

- [2] Tucker Jr RC. Thermal spray coatings: Broad and growing applications. *International Journal of Powder Metallurgy* 2002; 38(7): 45-53.
- [3] Batra U. Thermal spray coating of abradable Ni based composite. *Surface Engineering* 2009; 25(4): 284-286. DOI: 10.1179/174329407X215087.
- [4] Molins R, Normand B, Rannou G, Hannoyer B, Liao H. Interlamellar boundary characterization in Ni-based alloy thermally sprayed coating. *Materials Science and Engineering A* 2003; 351(1-2): 325-333. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00839-0.
- [5] Wang J-H, Friesel M, Willander M, Warren R. Microstructure of Ni-based self-fluxing alloy sprayed coating. *Journal of Iron and Steel Research International* 2005; 12(2): 56-59.
- [6] Zhang XC, Xu BS, Xuan FZ, Tu ST, Wang HD, Wu YX. Porosity and effective mechanical properties of plasma-sprayed Ni-based alloy coatings. *Applied Surface Science* 2009; 255(8): 4362-4371. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.10.120.
- [7] Revun SA, Balakirev VF. Peculiarities of adhesion bond formation under gas-thermal coatings spraying. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov* 2002; 2: 55-62.
- [8] Jin Y, Qian Z, Wang C, Yue J, Li K. Process optimization of plasma spraying Ni-based alloy coating. *Heat Treatment of Metals* 2013; 38(4): 104-108.
- [9] Kromer R, Costil S, Cormier J, Courapied D, Berthe L, Peyre P, Boustie M. Laser surface patterning to enhance adhesion of plasma sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology* 2015; 278: 171-182. DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.07.022.
- [10] Skulev H, Malinov S, Basheer PAM, Sha W. Modifications of phases, microstructure and hardness of Ni-based alloy plasma coatings due to thermal treatment. *Surface and Coatings Technology* 2004; 185(1): 18-29. DOI:10.1016/j.surfcoat.2003.12.012.
- [11] Liu F, Liu C-S, Tao X-Q, Chen S-Y. Ni-based alloy cladding on copper crystallizer surface by laser. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University* 2006; 27(10): 1106-1109.
- [12] Felgueroso D, Vijande R, Cuertos JM, Tucho R, Hernández A. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings. *Wear* 2008; 264(4): 257-263. DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.015.
- [13] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Usplenjev GV. Focusators for laser-branding. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 311-322. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90018-0.
- [14] Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Soifer VA. Computer-aided design of diffractive optical elements. *Optical Engineering* 1994; 33(10): 3156-3166. DOI: 10.1117/12.178898.
- [15] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Soifer VA. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas. *Journal of Modern Optics* 1996; 43(7): 1423-1433. DOI: 10.1080/09500349608232815.
- [16] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA, Perlo P, Repetto P. Design of DOEs for wavelength division and focusing. *Journal of Modern Optics* 2005; 52(6): 917-926. DOI: 10.1080/09500340512331313953.
- [17] Pavelyev VS, Borodin SA, Kazanskiy NL, Kostyuk GF, Volkov AV. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface. *Optics & Laser Technology* 2007; 39(6): 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
- [18] Kazanskiy NL. Research & education center of diffractive optics. *Proceedings of SPIE* 2012; 8410: 84100R-1. DOI: 10.1117/12.923233.
- [19] Golovashkin DL, Kazanskiy NL. Solving diffractive optics problem using graphics processing units. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2011; 20(2): 85-89. DOI: 10.3103/S1060992X11020019.
- [20] Kazanskiy NL, Murzin SP, Osetrov YeL, Tregub VI. Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action. *Optics and Lasers in Engineering* 2011; 49(11): 1264-1267. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.07.001.
- [21] Murzin SP. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures. *Optics & Laser Technology* 2013; 48: 509-512. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.11.031.
- [22] Murzin SP. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment. *Optics & Laser Technology* 2015; 72: 48-52. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.03.022.
- [23] Murzin SP. Local laser annealing for aluminium alloy parts. *Lasers in Engineering* 2016; 33(1-3): 67-76.
- [24] Smelov VG, Sotov AV, Murzin SP. Particularly selective sintering of metal powders by pulsed laser radiation. *Key Engineering Materials* 2016; 685: 403-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.403.
- [25] Abulkhanov SR. Technologies of laser radiation focusators. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014; 9(11): 834-842. DOI: 10.3923/rjasci.2014.834.842.
- [26] Murzin SP. The research of intensification's expedients for nanoporous structures formation in metal materials by the selective laser sublimation of alloy's components [In Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(2): 175-179.
- [27] Murzin SP. Method of composite nanomaterials synthesis under metal/oxide pulse-periodic laser treatment [In Russian]. *Computer Optics* 2014; 38(3): 469-475.
- [28] Murzin SP Application of focusators of radiation to increase the efficiency of laser heat treatment and combined processing of materials [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 24: 114-120.
- [29] Murzin SP Development of technological method to improve the operational characteristics of parts by laser treatment and determination of requirements for the use of focusators of radiation [In Russian]. *Computer Optics* 2006; 30: 44-48.

#### *Authors' information*

**Serguei Petrovich Murzin** (b. 1963) graduated (1986) from the S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara National Research University, short – Samara University), majoring in Aircraft Engines. He received his Doctor in Technics (2005) degree from Samara National Research University. He is holding a position of professor in Samara University at Automatic Systems of Power Plant department. He is the Head of the Research & Education Center of Laser systems and Technologies. 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. E-mail: [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru).

*Received June 1, 2016. The final version – June 16, 2016.*