

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ЗАПЛАВЛЕНИЯ УЗКИХ ПОЛОСТЕЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**В. Ю. ХАСКИН**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности применения гибридной лазерно-дуговой наплавки для качественного заплавления узких полостей в изделиях из алюминиевых сплавов без предварительной механической разделки. Описаны эксперименты по подбору режимов. Показана целесообразность внедрения такой технологии.

*Ключевые слова:* гибридная лазерно-дуговая наплавка, алюминиевые сплавы, режимы наплавки, лазерное излучение, дуга плавящегося электрода, присадочная проволока, поршень двигателя, технология наплавки

Гибридную лазерно-дуговую наплавку применяют для устранения дефектов в литых изделиях, при ремонте трещин в корпусах машин и механизмов или восстановлении изношенных в процессе эксплуатации деталей. При дуговой наплавке существует проблема качественного заплавления нижних частей узких полостей в изделиях из алюминиевых сплавов и сталей без их предварительной механической разделки. Как правило, на практике механическим способом устраняют, скругляют или делают тупыми углы в нижней части изделий, что позволяет избежать образования пор. В работе [1] предложено разработать такие технологические приемы гибридной наплавки, с помощью которых за счет влияния лазерного излучения на электрическую дугу (например, заглубление ее в узкую щель) устранялась бы необходимость в предварительной механической обработке.

Разрабатываемые способы наплавки применимы, например, при восстановлении поршней двигателей внутреннего сгорания, выполненных из алюминиевых сплавов. Часто дизельные двигатели эксплуатируются с максимальной нагрузкой и на протяжении длительного времени (тепловозные и судовые двигатели). Такие условия перегрузки отрицательно сказываются на деталях двигателей. Во время работы двигателя компрессионные кольца, установленные на поршнях, разбивают стенки канавок, в которых они находятся, что со временем приводит к выходу поршней из строя. В связи с этим существует постоянная потребность в обновлении или ремонте поршней для судовых (тепловозных) двигателей. Проблемным является также наличие запасных частей (в частности поршней) для автомобилей мелкосерийного производства.

Возникает задача восстановления, которая может быть решена различными способами, простейший из которых — дуговая наплавка, использующая дугу с плавящимся электродом (например, [2]). Однако при таком способе наплавки возникает ряд проблем: необходима предварительная разделка кромок в теле поршня; имеют место интенсивное разбрызгивание электродного металла и повышенная пористость наплавленного металла; тепловой режим дуговой наплавки алюминиевых материалов способствует формированию крупнозернистой структуры наплавленного металла, что может привести к понижению износостойкости канавок наплавленных поршней. Указанные проблемы можно устранить с помощью разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона технологии двухдуговой наплавки с использованием неплавящегося и плавящегося электродов [3]. Такой способ наплавки предусматривает очередное и раздельное формирование дуг с неплавящимся и плавящимся электродом с образованием общей ванны расплавленного металла, что исключает их электромагнитное взаимодействие, обеспечивает интенсивное перемешивание расплавленного металла и его дегазацию, позволяет получить наплавленный металл с мелкокристаллической структурой и равномерным распределением упрочняющих интерметаллидных фаз.

Наиболее приемлемым в плане промышленного применения можно считать способ наплавки и упрочнения поршней двигателей внутреннего сгорания [3], хотя на сегодня созданы и другие способы, например, плазменное упрочнение канавок поршней автомобильных двигателей [4] и электронно-лучевое восстановление поршней двигателей внутреннего сгорания [5]. На основании последней технологии в ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ электронно-лучевой упрочняющей наплавки поршней двигателей внутреннего сгорания, который позволяет получать металл зоны упрочнения с твердостью  $HV$  150...180 [6, 7]. При этом твердость упрочненного

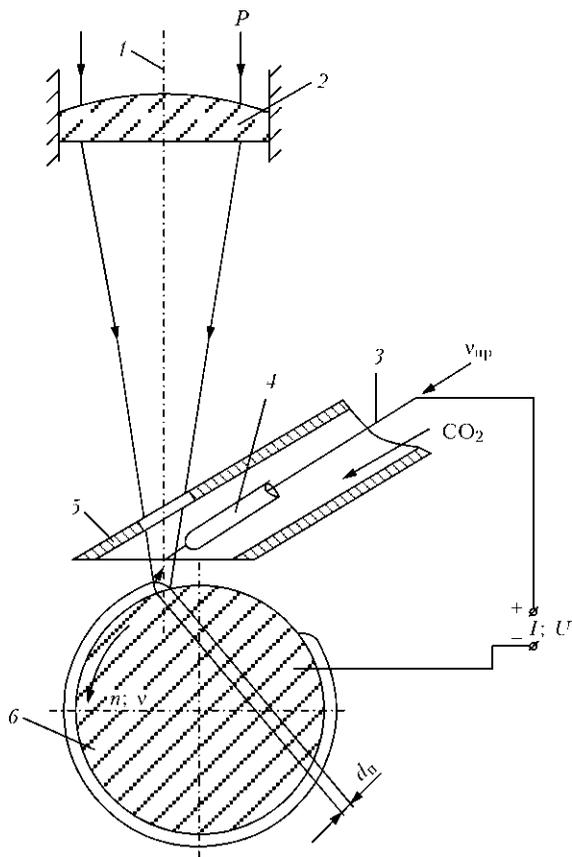


Рис. 1. Схема процесса гибридной наплавки тел вращения: 1 — лазерное излучение; 2 — фокусирующая линза; 3 — электродная (присадочная) проволока; 4 — медный мунштук; 5 — сопло для подачи защитного газа; 6 — образец;  $P$  — мощность излучения, кВт;  $v_{пр}$  — скорость подачи присадочной проволоки, м/ч;  $n$  — частота вращения образца,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $v$  — скорость наплавки, м/ч;  $d_n$  — диаметр пятна фокусирования излучения, мм;  $I$  — сварочный ток, А;  $U$  — напряжение, В

слоя при температуре 100...360 °С в 2...3 раза выше, чем основного металла поршня, что способствует повышению моторесурса поршневой группы в 1,5...2,0 раза. Однако эта технология имеет и ряд недостатков, основным из которых является необходимость использования электронно-лучевых камер, что требует чрезвычайно тщательной подготовки деталей перед наплавкой (в первую очередь их очистка от загрязнений). Кроме того, потребность в вакуумировании обрабатываемой детали уменьшает производительность процесса наплавки. Устранение указанных недостатков возможно путем замены электронного луча лазерным.

Техническая целесообразность замены описанных в работах [5–7] электронно-лучевых технологий лазерными аналогами дополняется также возможностью очистки наплавляемой канавки лазерным излучением без традиционного применения химически агрессивных сред [8]. Однако с экономических позиций (учитывая стоимость лазерной установки) такая замена вызывает опре-

деленные сомнения. В связи с этим для решения рассматриваемой задачи предлагаем использовать гибридную технологию, при которой лазерное излучение действует совместно с дугой плавящегося электрода. Использование дугового источника позволит уменьшить требуемую для наплавки лазерную мощность как минимум в 2 раза [9], а лазерное излучение даст возможность сжать электрическую дугу и опустить ее на дно канавки поршня. Как показали предварительные исследования, благодаря значительным скоростям процесса наплавки достигается его высокая производительность [10].

С целью определения возможности использования гибридной лазерно-дуговой наплавки для заплывания полостей без предварительной разделки на алюминиевых образцах с ровной поверхностью (без канавок) проводили предварительный подбор режимов наплавки, а на образцах с узкими канавками — окончательный. При этом применяли как цилиндрические (согласно представленной на рис. 1 схеме), так и плоские образцы. Для проведения экспериментов использовали стелды на базе токарного станка с подводом излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, а также трехкоординатного манипулятора с применением излучения Nd:YAG-лазера, внешний вид которого представлен на рис. 2. В качестве образцов для экспериментов использовали как плоские пластины 200×100×10 мм (в том числе с прорезанными пазами шириной 3 мм и глубиной 5 мм), которые наплавляли на стенде, смонтированном на базе манипулятора, так и валики диаметром 50...80 мм, которые наплавляли на стенде, смонтированном на базе токарного станка. Материалом образцов был алюминиевый сплав АМг6, наплавку выполняли с помощью электродных (присадочных) проволок СвАМг6 и СвАК5 диаметрами 1,2 мм.

При наплавке образцов питание дуги плавящегося электрода осуществляли от источника TPS2700 (фирма «Фрониус», Австрия). Основное отличие гибридной наплавки от гибридной сварки [1] состояло в том, что лазерное излучение фокусировалось на поверхности наплавляемого образца в пятно диаметром  $d_n$  около 2...3 мм за счет расфокусировки  $\Delta F = +(10...15)$  мм.

В экспериментах применяли линзы из монокристаллов хлорида калия с фокусом  $F = 300$  мм. В случае гибридной наплавки мощность падающего на образец непрерывного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера составляла 1,5 кВт, а максимальная мощность импульсно-периодического излучения Nd:YAG-лазера в пике импульса  $P_{\text{max}} = 3$  кВт (средняя мощность  $P_{\text{cp}} = 2,3$  кВт). При лазерной наплавке использовали импульсно-периодическое излучение Nd:YAG-лазера с  $P_{\text{cp}} = 3$  кВт (до 4 кВт в пике импульса). Использование импульсного излучения обусловлено необходимостью устране-

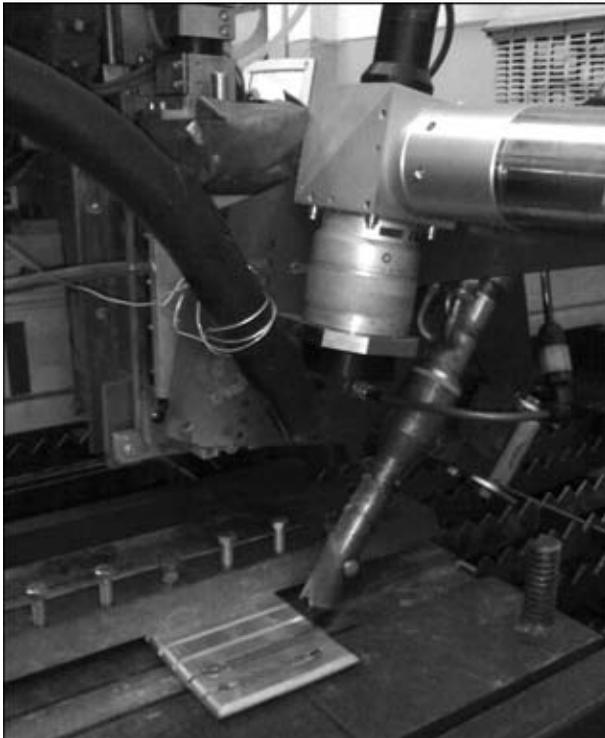


Рис. 2. Стенд для лазерно-дуговой наплавки плоских алюминиевых имитаторов поршневых канавок, выполненный на базе трехкоординатного манипулятора

ния эффекта образования аргоновой плазмы, поглощающей лазерное излучение и негативно влияющей на процесс наплавки. В качестве защитного газа при лазерной и гибридной наплавке использовали аргон и гелий, расход которых составлял 8...10 л/мин. Скорость лазерной и гибридной наплавки — 60 м/ч. Гибридную наплавку алюминиевого сплава осуществляли в импульсном режиме при токе  $I = 200...230$  А и напряжении  $U = 22...24$  В. Дугу плавящегося электрода подавали в хвостовую часть ванны на расстоянии до 1...3 мм от оси лазерного излучения. Угол наклона оси мундштука, подающего проволоку к оси лазерного излучения, составлял 25...35°.

Образцы наплавленных алюминиевых сплавов изучали по поперечным макрошлифам сечений, сделанным в начале, середине и конце наплав-

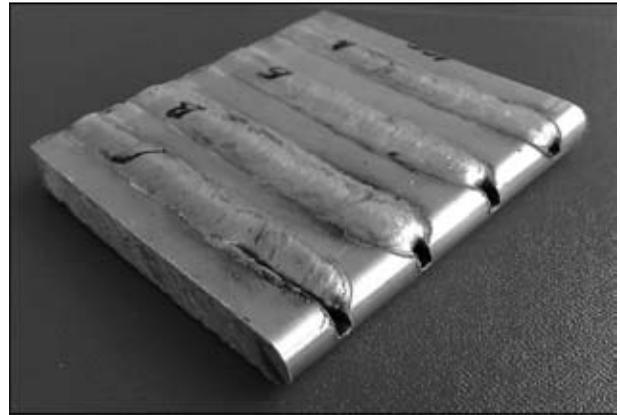


Рис. 3. Внешний вид валиков, наплавленных в канавках на образце из сплава АМг6 ( $\delta = 10$  мм) с применением проволоки СвАК5 ( $d = 1,2$  мм): слева направо — дуговая наплавка при  $I = 210$  А,  $U = 23$  В и  $I = 250$  А,  $U = 25$  В, две канавки — гибридная наплавка

ленных валиков. Рассмотрим подробнее полученные результаты.

Внешний вид образца из алюминиевого сплава АМг6 с наплавленными канавками показан на рис. 3. Первые две канавки на нем выполнены дуговым способом наплавки, а вторые две — гибридным. Эксперименты показали, что при использовании проволоки СвАК5 швы имеют более гладкую поверхность и нижняя часть канавки заправляется лучше, чем при применении проволоки СвАМг6 (рис. 4 и 5). Это объясняется повышенной растекаемостью последней за счет высокого содержания в ней кремния. С использованием этой проволоки выполнен показанный на рис. 5, б валик, режим наплавки которого можно считать наилучшим в условиях проводимых экспериментов. Однако с помощью гибридного способа наплавки можно достичь хорошего формирования швов и полного заправления нижней части канавок и при использовании проволоки СвАМг6 (рис. 4). Повышение сварочного тока позволяет улучшить сплавление в нижней части канавки (рис. 4, б и 5, з), но при этом происходит недопустимый перегрев образца. Отметим, что характерным дефектом дуговой наплавки узких канавок без механической разделки является несплавление

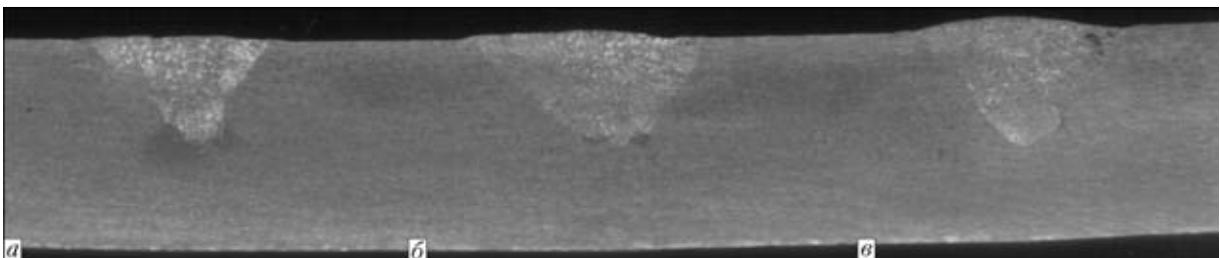


Рис. 4. Макрошлифы валиков, наплавленных в канавках на образце из сплава АМг6 ( $\delta = 10$  мм) с использованием электродной проволоки СвАМг6 ( $d = 1,2$  мм) со скоростью 60 м/ч в аргоне: а, б — дуговой способ наплавки соответственно  $I = 200$  А,  $U = 22,5$  В,  $v_{пп} = 12,7$  м/мин и  $I = 220$  А,  $U = 23$  В,  $v_{пп} = 15$  м/мин; в — гибридная наплавка при  $P_{ср} = 2,34$  кВт ( $P_{max} = 3,00$  кВт),  $I = 200$  А,  $U = 22,5$  В,  $v_{пп} = 12,7$  м/мин

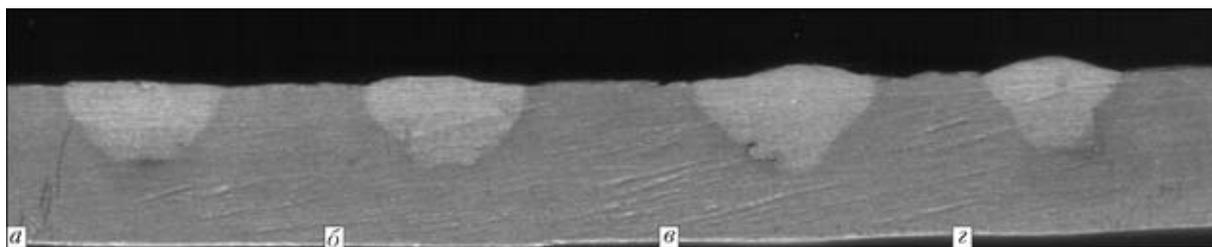


Рис. 5. Макрошлифы валиков, наплавленных в канавках на образце из сплава АМг6 ( $\delta = 10$  мм) с использованием электродной проволоки СвАК5 ( $d = 1,2$  мм) со скоростью 60 м/ч в аргоне: а, з — дуговой способ наплавки соответственно  $I = 206$  А,  $U = 22,6$  В,  $v_{\text{пр}} = 12,7$  м/мин и  $I = 226$  А,  $U = 23,8$  В,  $v_{\text{пр}} = 15$  м/мин; б, в — гибридный (соответственно  $P_{\text{ср}} = 2,34$  кВт ( $P_{\text{max}} = 3,00$  кВт),  $I = 200$  А,  $U = 22,5$  В,  $v_{\text{пр}} = 12,7$  м/мин и  $P_{\text{ср}} = 2,34$  кВт ( $P_{\text{max}} = 3,00$  кВт),  $I = 210$  А,  $U = 22,8$  В,  $v_{\text{пр}} = 13$  м/мин

наплавленного металла с основным в нижних их частях (рис. 3, 4, а и 5, а, з).

Для сравнения и оценки описанных результатов гибридной наплавки с использованием аналогичных материалов выполнили лазерную наплавку с теми же скоростями процесса и подачи проволоки, что потребовало повысить среднюю мощность импульсно-периодического излучения до 3 кВт. Полученная структура наплавленного металла была значительно более мелкодисперсной, чем при гибридной наплавке. Сравнение гибридного способа наплавки с лазерным показало большую локальность нагрева во втором случае, однако при этом расход энергии лазерного излучения возрастает почти вдвое и примерно во столько же раз повышается себестоимость одного погонного метра сварки. Это объясняется различиями в тепловых процессах и степени поглощения лазерного излучения при указанных двух способах наплавки. В случае гибридной наплавки экономия энергии лазерного излучения достигается за счет его хорошего поглощения металлом, расплавленным маломощной электрической дугой. При лазерной наплавке с использованием присадочной проволоки энергия излучения дополнительно расходуется на отражение от расплавленной проволоки и теплоотвод в нее.

При оценке качества наплавленных слоев следует отметить, что при лазерной наплавке проволокой характерным дефектом является образование пор, надежным способом устранения которого является повышение мощности лазерного излучения. Наименьшее количество дефектов наблюдается при применении гибридной наплавки. При этом способе наплавки важным моментом является заглупление электрической дуги в узкую полость, которое прямо пропорционально плотности мощности излучения. Если она недостаточна, то имеют место поры или несплавления в нижней части заправляемой полости. Наиболее простым способом повышения плотности мощности является уменьшение расфокусировки  $\Delta F$ . Однако при этом увеличивается степень перемешивания основного и наплавленного металлов и процесс наплавки становится подобен процессу

сварки. Вопрос оптимизации плотности лазерной мощности при гибридной наплавке требует дальнейших исследований.

## Выводы

1. Достижение качественного заплывания узких полостей в алюминиевых изделиях без механической разделки возможно за счет фиксации электрической дуги на дне полости с помощью лазерного излучения. Лазерно-дуговая наплавка позволяет устранить такие характерные для дугового процесса недостатки, как наличие пор и несплавления в нижней части заправляемых полостей, а также снизить перегрев наплавленных изделий.

2. Преимуществом гибридной наплавки являются частичная замена мощности лазерного излучения мощностью дуги плавящегося электрода, а также то, что расплавленный электрической дугой жидкий металл поглощает лазерное излучение значительно интенсивнее, чем твердый. Последнее способствует снижению потерь мощности лазерного излучения по сравнению с лазерной наплавкой.

3. При гибридной наплавке избыток тепловложения может привести к деформации наплавленного изделия. Вопросы, связанные с оценкой твердости и износостойкости слоев, полученных при лазерно-дуговой наплавке, требуют дальнейшего изучения.

1. Гибридная сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гарашук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 38–41.
2. Зусин В. Я., Вайнер Г. Н., Черноиванов В. Н. Восстановление канавок алюминиевых поршней тракторных двигателей импульсно-дуговой наплавкой в среде защитных газов // Свароч. пр-во. — 1982. — № 11. — С. 37–38.
3. Воронай Н. М., Лесных В. В., Мищенко В. А. Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным — неплавящимся и плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1996. — № 6. — С. 21–25.
4. Чудинов Б. А., Жмиевский В. Ф. Упрочнение верхней поршневой канавки поршней двигателей внутреннего сгорания ОАО «АВТОВАЗ», Тольятти, 2004 г. 13–16 апр. // Материалы 6-й Междунар. практ. конф.-выставки, С.-Пб., Альфаред, 2004. — С. 89–90.

5. *Бондарев А. А.* Технология ремонта изношенных поршней // Сварщик. — 1999. — № 6. — С. 17.
6. *Бондарев А. А.* Технология упрочняющей наплавки с присадочным материалом зоны компрессионных каналов алюминиевых поршней // Технологии. Материалы. Оборудование.: Каталог. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2005. — С. 27–28.
7. *Бондарев А. А.* Технология ремонта и восстановления изношенных поршней и других деталей машин и механизмов // Там же. — С. 28.
8. *Вейко В. П.* Физические механизмы лазерной очистки поверхности // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физ. — 2001. — 65, № 4. — С. 586–590.
9. *Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др.* // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 49–53.
10. *Гибридная лазерно-дуговая сварка углеродистых сталей и алюминиевых сплавов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Набок и др.* // Доп. НАН України. — 2005. — № 7. — С. 97–102.

Peculiarities of application of hybrid laser-arc cladding for quality filling of narrow cavities in products of aluminium alloys without preliminary mechanical grooving are considered. Rational implementation of this technology is shown.

Поступила в редакцию 08.08.2008,  
в окончательном варианте 26.11.2008

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ, ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ»**

14–17 апреля 2009

г. Санкт-Петербург

*Организаторы: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и НПФ «Плазмацентр»*

### **Основные направления конференции:**

- технологии диагностики, дефектации, мойки, очистки, восстановления заданной геометрии, упрочнения и восстановления поверхности, обработки нанесенных покрытий, окраски и консервации;
- трение и износ, защита от коррозии, конструкционные, технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества и повышения долговечности изделий.

### **В рамках конференции будет проходить:**

- школа-семинар «Все методы повышения стойкости инструмента, штампов холодного деформирования, пресс-форм и другой технологической оснастки»;
- школа-семинар «Наплавка и напыление — выбор технологии, оборудования и материалов»;
- школа-семинар «Ремонт, восстановление, упрочнение и контроль качества литейной оснастки кузнечно-прессового инструмента и штампов»;
- школа-семинар «Конструирование деталей и узлов трения с повышенной долговечностью и износостойкостью».

Более подробную информацию о предстоящей конференции  
можно узнать на сайте [www.plasmacentre.ru/conf](http://www.plasmacentre.ru/conf).

**Реквизиты организатора: НПФ «Плазмацентр»,  
195196, Санкт-Петербург, Таллиннская ул., д. 7А, офис 16  
Тел./факс: (812) 4452496, (901) 3043191, (812) 5287484  
E-mail: [info@plasmacentre.ru](mailto:info@plasmacentre.ru), [office@plasmacentre.ru](mailto:office@plasmacentre.ru)**