



# ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РОТОРНОЙ ЧАСТИ ГТД

**А. В. ОВЧИННИКОВ**, канд. техн. наук (Запорож. нац. техн. ун-т)

Рассмотрено влияние структурного состояния присадочных материалов на структуру и свойства швов сварных соединений жаропрочного титанового сплава ВТ8 применительно к ремонту деталей авиадвигателей. Установлено, что применение присадочных материалов с субмикроструктурной структурой позволяет обеспечить повышение уровня механических свойств соединений.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, титановый сплав ВТ8, присадочные материалы, ремонт авиадвигателей, субмикроструктурная структура, металл шва, поры, механические свойства

Применение сварки при производстве и ремонте изделий из сложнолегированных титановых сплавов связано с целым рядом проблем. Наиболее сложной является сварка двухфазных титановых сплавов, используемых в газотурбинных двигателях, так как их применяют в различном структурном состоянии, обеспечивающем необходимый уровень механических и служебных свойств материала [1]. Проблемы свариваемости связаны с изменением структуры сварного шва и металла ЗТВ, а также с образованием дефектов структуры сварного шва (пористость, неметаллические включения, химическая и структурная неоднородность). Одним из основных дефектов является пористость сварного шва, на долю которой приходится до 56 % общего количества дефектов [2]. Свойства сварного шва и появление в его структуре таких дефектов, как поры, неметаллические включения, химическая и структурная неоднородность непосредственно зависят от состава и качества присадочных материалов. Особое значение вопросы, связанные с качеством присадочных материалов, приобрели в последние годы, так как сложнолегированные жаропрочные титановые сплавы применяют для тонкостенных деталей (лопаток, моноколес и др.), работающих на пределе запаса прочности материала. Поэтому наличие микродефектов в присадочных материалах может привести к полной потере работоспособности восстанавливаемых деталей. В ряде работ описаны способы уменьшения количества дефектов в присадочных материалах [3, 4], однако предложенные решения относятся к поверхностным дефектам и не решают проблем объемного структурного состояния присадок.

Таким образом, при сварке ответственных деталей из жаропрочных титановых сплавов, приме-

няемых для роторных деталей газотурбинных двигателей, необходимо, чтобы присадочные материалы обеспечивали стабильно высокое качество сварного шва. В настоящей работе рассмотрены вопросы влияния структурного состояния присадочных материалов на структуру и свойства швов сварных соединений жаропрочных титановых сплавов.

**Материалы и методика исследований.** В качестве объекта исследований выбраны сварные соединения из двухфазного жаропрочного титанового сплава ВТ8, который используется для моноколес (блисков) компрессора высокого давления (КВД) турбовентиляторного двигателя Д27. Пластины из сплава ВТ8 толщиной 2 мм сваривали способом аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом диаметром 1,8 мм на режимах  $I_{св} = 180$  А,  $U_{св} = 10$  В. Использовали источник питания ВД302, камеру У6872-5306 с контролируемой атмосферой (аргоном), присадочные материалы стандартных составов (проволоку из сплава ВТ2 и прутки из сплава ВТ8). В качестве экспериментальных присадочных материалов применяли прутки диаметром 2 мм того же состава, но с субмикроструктурной (СМК) структурой. Заготовки для прутков с СМК структурой получали при реализации интенсивной пластической деформации (ИПД) методом винтовой экструзии с одновременным действием нормальных и касательных напряжений при температурах 400...800 °С [5, 6].

Химический состав исследовали с помощью спектрального анализа по ГОСТ 1 9863.1-19863.13 и микроанализа на растровом электронном микроскопе JSM-T300 фирмы «JEOL». Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе «Neophot-32» и просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CXII при ускоряющем напряжении 100 кВ, а также на растровых электронных микроскопах JSM-T300 и РЭМ-106И с энергодисперсионным анализом по линии и в точке. Механи-

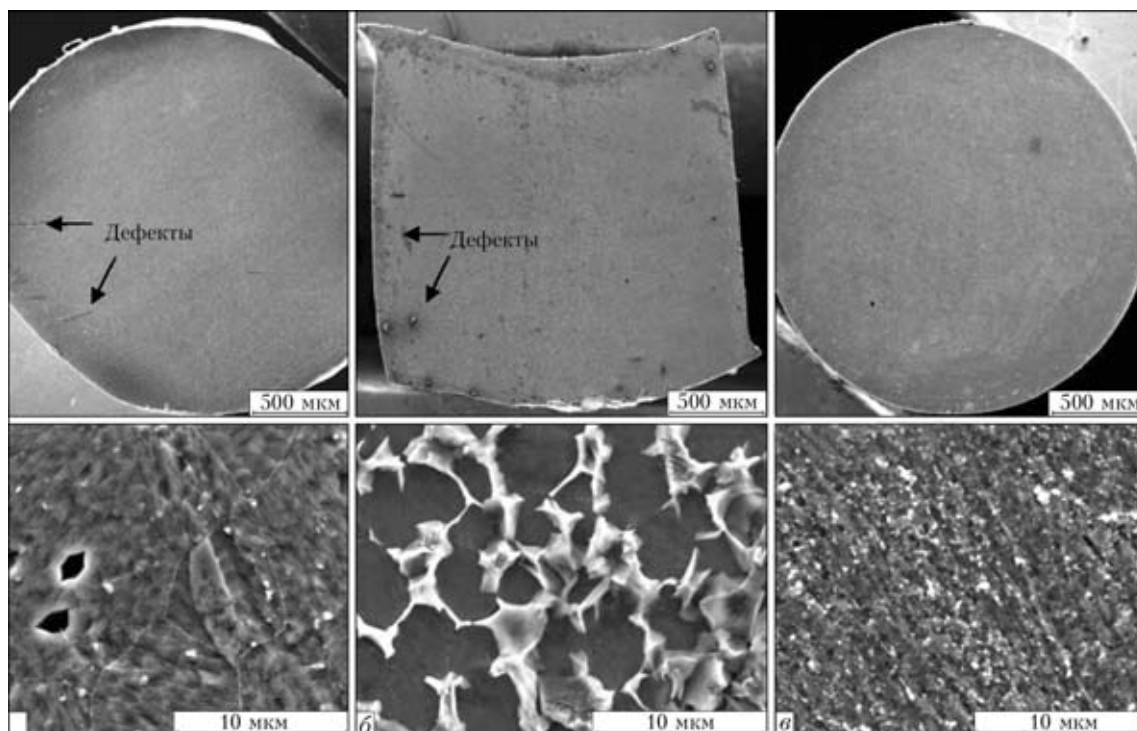


Рис. 1. Макро- и микроструктура присадочных материалов: *а* — проволока из сплава ВТ2; *б* — пруток из сплава ВТ8; *в* — пруток из сплава ВТ2 с СМК структурой

ческие свойства определяли на разрывной испытательной машине фирмы «INSTRON». Статическую прочность и угол загиба  $\psi$  сварных соединений определяли согласно ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» и ГОСТ 14019–2003 «Материалы металлические. Метод испытания на изгиб», а количество пор — методами количественной металлографии [7]. При анализе поверхности разрушения образцов по сварному шву фиксировалось количество и размер пор на 1 мм<sup>2</sup>. Микротвердость исследовали на микротвердомере ММ7Т фирмы «BUEHLER» (по методике в соответствии с ГОСТ 9450–76).

**Результаты исследований и их анализ.** Как отмечалось выше, основными причинами пористости сварного шва являются дефекты в структуре присадочных материалов. На основании анализа результатов исследований макро- и микроструктуры стандартных присадочных материалов установлено наличие пор и несплошностей в проволоке из сплава ВТ2 (рис. 1, *а*). Данные дефекты являлись технологическими, характерными для деформированных сплавов.

Второй недостаток, касающийся химической и структурной неоднородности в присадочных материалах, характерен для сложнoleгированных титановых сплавов (рис. 1, *б*). Исследования стандартных присадочных материалов, применяемых для сварки сплава ВТ8, показали, что в них наблюдалась химическая неоднородность (рис. 2).

Микроанализ структурных составляющих показал существенную разницу в содержании ос-

новных легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах для сплава со средним химическим составом, мас. %: Ti — основа; 5,8 Al; 3,1 Mo; 0,3 Si; 0,5 Zr. В  $\alpha$ -фазе содержание  $\alpha$ -стабилизирующего алюминия составляло около 5,24 %, при этом его минимальное содержание в  $\beta$ -фазе находилось в пределах 2 % (табл. 1). Обратная закономерность имела место в распределении  $\beta$ -стабилизирующих элементов, что наиболее сильно выражено в содержании молибдена (более 10 раз).

Наличие химической неоднородности определяло различие механических свойств фаз. Исследование микротвердости структурных составляющих сплава ВТ8 позволило установить, что  $\alpha$ -фаза в среднем имела микротвердость  $3932 \cdot 10^6$  МПа, а  $\beta$ -фаза —  $2215 \cdot 10^6$  МПа. Разница в микротвердости между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами составила более 70 %. При сварке и наплавке тонкостенных ответственных изделий толщиной до 1 мм (лопатки, моноколеса и др.) такая разница состава и свойств фаз в стандартных присадках может привести к существенному изменению свойств сварного шва.

**Таблица 1.** Содержание легирующих элементов в структурных составляющих сплава ВТ8, мас. % (Ti — основа)

Участок анализа (фаза)	Al	Mo	Zr	Fe	Si
001 ( $\alpha$ -фаза)	5,24	0,51	—	—	0,11
002 ( $\beta$ -фаза)	4,08	3,55	0,80	1,08	0,28
003 ( $\beta$ -фаза)	2,02	7,08	1,10	1,15	0,08

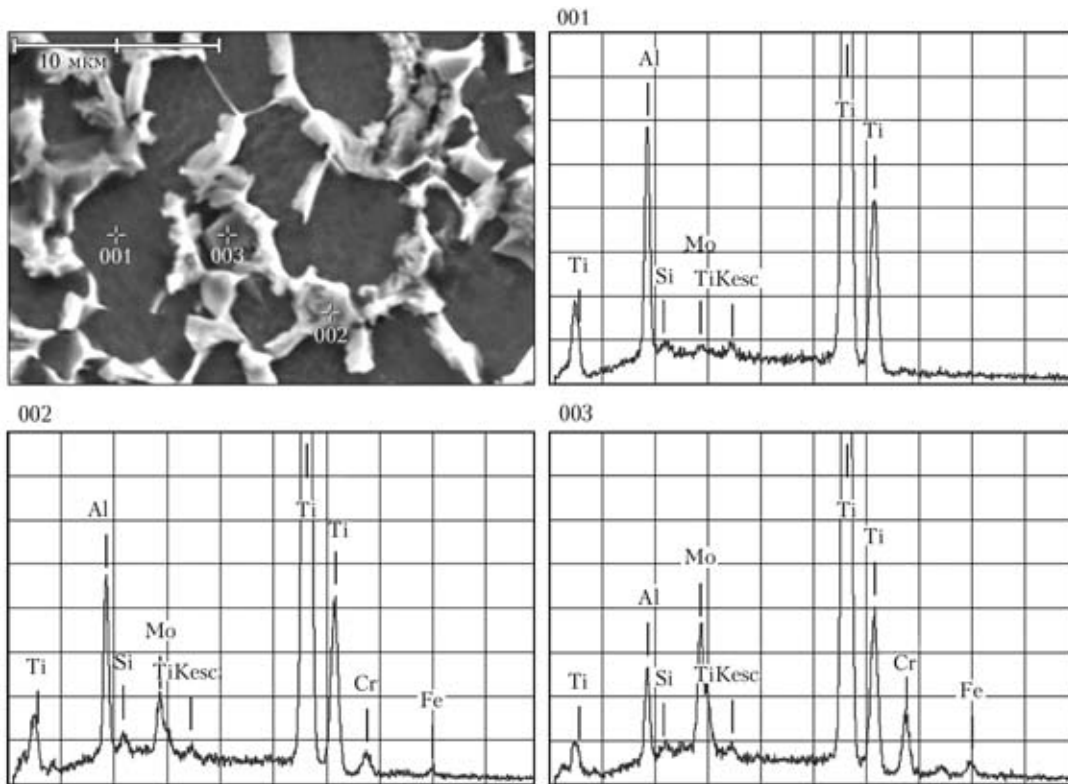


Рис. 2. Энергодисперсионные спектры в структурных составляющих присадочного материала из сплава ВТ8

Для устранения перечисленных дефектов сформулирован новый подход к формированию структуры присадочных материалов. Предложено применить присадочные материалы с нано- или СМК структурой. Это, согласно результатам ранее проведенных исследований, позволит получить равномерное распределение легирующих элементов в объеме присадочных материалов.

Прутки экспериментального материала получали по специально разработанной технологии, в основе которой лежал метод винтовой экструзии [5, 6]. Применение метода ИПД для сложнoleгированных титановых сплавов обеспечило более равномерное распределение легирующих элементов, что достаточно полно освещено в работах [8, 9]. В результате легирующие элементы распределялись равномерно по объему сплавов, а химическая и структурная неоднородность в присадочных материалах с структурой СМК практически отсутствовала. В присадочных материалах с структурой СМК отсутствовали поры, нес-

плошности и другие дефекты, отмеченные для стандартных сплавов, что хорошо видно на макро- и микрошлифах (см. рис. 1, в). Отсутствие указанных дефектов, очевидно, являлось следствием «залечивания» пор под действием высоких давлений и повышенной температуры. Аналогичный эффект используется при обработке литых титановых деталей в газостате [10, 11].

Сравнительные исследования сварных соединений пластин из жаропрочного титанового сплава ВТ8, полученных с применением стандартных присадочных материалов и с структурой СМК, показали, что во втором случае имело место повышение уровня механических свойств сварных соединений (табл. 2).

Как следует из анализа представленных данных, уровень механических свойств сварных соединений, полученных с применением СМК присадочных материалов, в сравнении со стандартными присадками повысился по показателям как прочности, так и по пластичности. Применение присадок с СМК структурой позволило повысить стабильность свойств сварных соединений. Среднее значение предела прочности для сварных соединений с применением присадок с СМК структурой, полученных из титана ВТ2, составило 948 МПа, а для стандартных присадок не превысило 890 МПа. Разница в показателе предела прочности между соединениями, полученными с присадками с СМК структурой и стандартными из сплава ВТ8, составила 65 МПа.

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сварных соединений пластин из титанового сплава ВТ8, полученных с использованием различных присадочных материалов

Присадка	Место разрушения	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , град
ВТ2	Сварной шов	888,0	476,7	5,9	61,5
ВТ2 (СМК)	» »	948,3	520,0	6,5	72,0
ВТ8	ЗТВ, сварной шов	1083,2	656,3	4,7	23,0
ВТ8 (СМК)	ЗТВ	1148,3	705,7	5,4	31,3

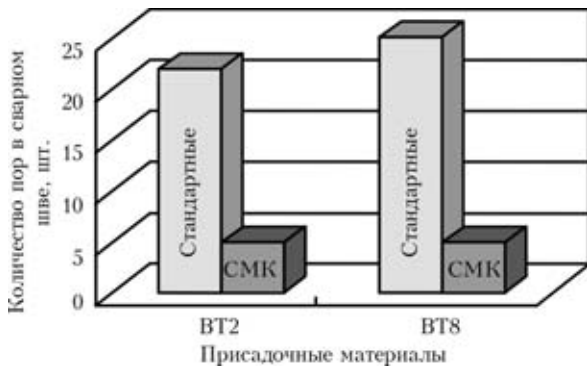


Рис. 3. Количество пор на поверхности разрушения металла сварного шва в соединениях сплава BT8, полученных с применением стандартных и опытных (СМК) присадочных материалов

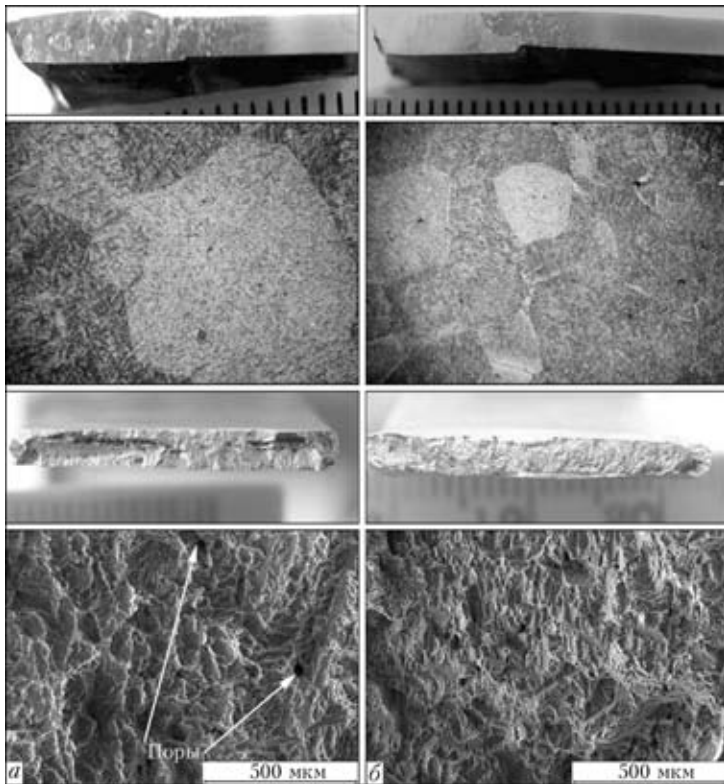


Рис. 4. Характерный вид поверхности разрушения и микроструктура металла шва сварных соединений сплава BT8 с применением стандартных (а) и опытных (СМК) (б) присадочных материалов из сплава BT2

Аналогичная тенденция установлена и для показателей пластичности. Для сварных швов, полученных с помощью присадок с СМК структурой, среднее значение угла загиба на 14,58 % для присадки из BT2 и 26,4 % для присадки из BT8 больше, чем для швов, полученных с присадками со стандартной структурой.

Важным аспектом является повышение стабильности свойств опытных соединений. Так, максимальный разброс свойств установлен у соединений, полученных с применением стандартных присадок. По показателям прочности разброс свойств составлял: по  $\sigma_b$  около 15, по  $\sigma_T$  около 19 %. При этом образец разрушился по сварному

шву, а следовательно, причиной разрушения являлись дефекты структуры. Для сварных соединений, полученных присадками с СМК структурой, разброс свойств по прочности не превышал 3, а по углу загиба — 12 %. Для стандартных присадок разница по углу загиба сварных соединений составила около 33 %. Установленная закономерность характерна и для относительного удлинения. В целом сварные соединения, полученные с применением присадок с СМК структурой, имели более высокие показатели механических свойств: предел прочности на 6,32 и 5,66 %, предел текучести на 8,14 и 7 %, относительное удлинение на 8 и 15 %, угол загиба на 14,5 и 26,4 % для нелегированных и легированных присадок соответственно.

Более высокие и стабильные свойства сварных соединений, полученных с применением присадок с СМК структурой, можно объяснить тем, что в структуре сварных соединений значительно меньшее количество дефектов. Это подтвердили результаты исследований дефектов сварного шва. В качестве дефектов рассматривали поры на поверхности разрушения сварного шва с размером более 20 мкм. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Как следует из анализа представленных данных, в сварных соединениях, полученных присадками с СМК структурой, количество пор в 4...5 раз меньше, чем для соединений, полученных по стандартной технологии. Уменьшение количества дефектов в сварном шве опытных соединений привело к повышению вязкости разрушения металла шва, что следует из характера поверхности разрушений сварных соединений (рис. 4).

На поверхности разрушения сварного соединения, полученного по стандартной технологии, установлены поры размером от 20 до 80 мкм. Характер разрушения образцов позволяет сделать вывод о причастности обнаруженных пор к образованию первичных трещин и последующего их развития. В соединениях, полученных с применением сплавов с СМК структурой, поры практически отсутствовали, что, по-видимому, и обеспечило более высокий уровень механических свойств этих соединений в сравнении со стандартными.

**Заключение.** Применение присадочных материалов с СМК структурой взамен стандартных присадок позволяет:

устранить поры и несплошности в структуре присадочных материалов в результате «залечивания» последних под действием объемной дефор-



мации при повышенной температуре по принципу, аналогичному газостатической обработки;

снизить химическую и структурную неоднородность, характерную для присадок из двухфазных титановых сплавов;

увеличить энергоемкость разрушения сварных соединений жаропрочных титановых сплавов за счет снижения количества дефектов в структуре сварного шва;

повысить значения механических свойств сварных соединений из сплава ВТ8 в сравнении с соединениями, полученными с применением стандартных присадок.

1. Колачев Б. А., Мальков А. В. Физические основы разрушения титана. — М.: Металлургия, 1983. — 160 с.
2. Муравьев В. И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов // Металловедение и терм. обработка мет. — 2005. — № 7. — С. 30–37.
3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. С. М. Гуревича. — Киев: Наук. думка, 1979. — 299 с.
4. Пат. 2201320 Россия, МПК В23К9/16. Способ аргонодуговой сварки / Б. И. Долотов, В. И. Меркулов. — Оpubл. 27.03.2003.

5. Винтовая экструзия — процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. — Донецк: ТЕАН, 2003. — 87 с.
6. Пат. 46999 Украина. Способ упрочнения материала и устройство для его осуществления / С. Г. Сынков, В. Н. Варюхин, В. Г. Сынков и др.; заявитель и патентообладатель ДонФТИ НАН Украины. — Заявл. 12.04.2001; Оpubл. 15.05.2001.
7. МР 149-36-81. Количественный металлографический анализ двухфазных титановых сплавов. — Введ. 20.01.81.
8. Применение винтовой экструзии для получения субмикрорекристаллической структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др. // Вестн. двигателестроения. — 2007. — № 2. — С. 185–188.
9. Оценка эффективности применения интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллической структуры в титановом сплаве ВТ3-1 / А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан, В. Г. Шевченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2007. — №1. — С. 27–31.
10. Падалко А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов. — М.: ИКЦ, 2007. — 267 с.
11. Гарибов Г. Ф. Развитие высокотемпературной газостатической обработки титановых сплавов // Технология легких сплавов. — 2006. — № 1/2. — С. 120–130.

Influence of structural condition of filler materials on the structure and properties of welds in welded joints of high-temperature titanium alloy VT8 is considered for the case of repair of aircraft engine parts. It is established that application of filler materials with a submicrocrystalline structure allows ensuring an increase of the level of the joint mechanical properties.

Поступила в редакцию 16.09.2011

## 14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И РЕМОНТА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

17–20 апреля 2012

Санкт-Петербург  
«Бизнес-отель «Карелия»

**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
и научно-производственная фирма «ПЛАЗМАЦЕНТР» при поддержке Северо-Западного  
федерального округа Российской Федерации и Комитета экономического развития,  
промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга приглашают  
сотрудников высшей школы, научных работников и аспирантов  
принять участие в конференции, посвященной:**

- конструкционным, технологическим и эксплуатационным методам повышения долговечности надежности изделий;
- технологиям наплавки, напыления, сварки, осаждения, модификации;
- технологиям ремонта — диагностике, дефектации, мойке, очистке, восстановлению размеров, обработке покрытий, окраске, консервации.

**Основные технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта  
будут рассмотрены на секциях:**

- упрочнение и модификация поверхности
- восстановление заданной геометрии
- механическая обработка нанесенных покрытий
- диагностика, дефектация, мойка и очистка
- окраска и консервация

**Контакты: +7(812) 444 93 37, +7(921) 973 46 74,  
факс: +7(812) 444 93 36, E-mail: info@plasmacentre.ru**