



УДК 669.187.56.001.1

НОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХКРУПНЫХ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ СПОСОБОМ ЭШН ЖМ*

Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко,
А. К. Цыкуленко, Б. Б. Федоровский, В. И. Ус

Рассмотрены некоторые возможности разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона нового технологического процесса получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ, основанного на применении однократной или последовательной многократной кольцевой электрошлаковой наплавки слоя металла заданного химического состава на центральный осевой слиток или поковку аналогичного химического состава и обеспечении удовлетворительной однородной структуры в наплавленном слитке. Определены основные геометрические параметры наплавленных круглых слитков массой 100 т с применением процесса ЭШН на базе 20-тонной печи ЭШП в зависимости от диаметра исходного центрального слитка. Проведены экспериментальные исследования модельных слитков ЭШН диаметром 170 мм из высоколегированной стали типа 316L, подтвердившие их высокую однородность, а также перспективность нового процесса укрупнения сечения и массы стальных слитков.

Some possibilities of the new technological process of producing super-large steel ingots using ESC LM method, developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute and based on application of single or sequential multiple circumferential electroslag cladding of metal layer of preset chemical composition on a central axial ingot or forging of similar chemical composition and on guarantee of a good homogeneous structure in the as-clad ingot, were considered. Main geometric parameters of as-clad round ingots of 100 t mass using ESC process were determined on the base of 20 t ESR furnace depending on diameter of initial central ingot. Experimental investigations were performed on model ESC ingots of 170 mm diameter, made from high-alloyed steel of 316L type, which confirmed their high homogeneity and also prospects of the new process of enlargement of section and mass of steel ingots.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; круглые крупнотоннажные стальные слитки ЭШП; высоколегированные стали и сплавы; пятнистая ликвация; укрупнение слитков ЭШП; электрошлаковый переплав по двухконтурной схеме титания; электрошлаковая наплавка жидким металлом; многократная кольцевая электрошлаковая наплавка

С развитием металлургической техники и повышением требований к энергомашиностроению изменяется и получает новый импульс производство крупнотоннажных слитков из высоколегированных сталей и сплавов. Для их изготовления используют разнообразные способы переплава, включающие как двойной вакуумно-индукционный переплав (ВИП) + электрошлаковый переплав (ЭШП) или ВИП + вакуумно-дуговой переплав (ВДП), так и тройной ВИП+ЭШП+ВДП переделы, что связано с проблемой образования пятнистой ликвации при

увеличении массы и сечения слитков, выплавляемых из современных высоколегированных сталей и сплавов [1].

Чтобы обеспечить решение данной проблемы, необходимо постоянное совершенствование технологий специальной электрометаллургии, в частности разработка новых технологических процессов ЭШП больших слитков из высоколегированных сталей и сплавов, склонных к пятнистой ликвации.

Приведенные в работе [2] макроструктуры продольного сечения большого и малого слитков ЭШП (рис. 1) показывают, что структура большого слитка имеет двухзонное строение — периферийную область столбчатых кристаллов и центральную область равноосных кристаллов —, а макроструктура малого слитка полностью состоит из столбчатых

* В работе принимали участие: инж. Н. Т. Шевченко, В. Л. Петренко, В. В. Жуков, В. М. Журавель, В. А. Зайцев, Р. В. Козин, А. А. Полишко, А. Г. Ремизов, В. М. Ярош (сотрудники ИЭС).

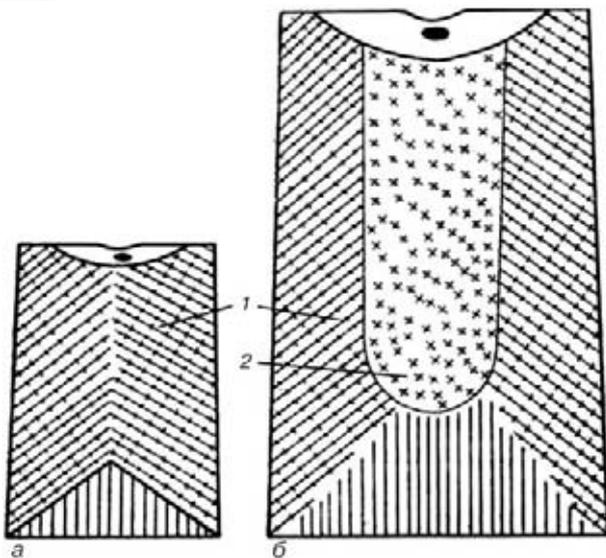


Рис. 1. Структурные зоны электрошлаковых слитков малого (а) и большого (б) сечения: 1 — столбчатые; 2 — равноосные кристаллы

кристаллов, отличающихся более тонкой структурой, по сравнению со структурой большого слитка. Для большого слитка ЭШП, имеющего значительное сечение, характерны более глубокая ванна и больший объем жидкого металла, кристаллизующегося в каждый момент процесса его наплавки по высоте, чем для слитка ЭШП гораздо меньшего сечения. Это и обуславливает более грубозернистую макроструктуру больших слитков, а также создает благоприятные условия для развития в них процессов ликвации.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона новая технологическая схема электрошлакового переплава

по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) [3–5] отличается от канонической схемы ЭШП тем, что в ней не существует жесткой связи между производительностью процесса и температурным режимом плавки, характером теплоотвода, осуществляемого в центральную часть слитка, и отводом тепла по его периферии. Применение схемы ЭШП ДС в значительной мере расширяет возможности контроля профиля, глубины жидкометаллической ванны и протяженности двухфазной зоны при затвердевании слитков с целью предотвращения развития в них нежелательных ликвационных процессов [3–5]. Тем не менее практическая реализация ЭШП ДС возможна только при использовании расходующих электродов.

Большие возможности при решении проблемы производства крупных кузнечных слитков для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов получил разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона новый технологический процесс электрошлаковой наплавки укрупнения слитков (ЭШНу) [6], основанный на применении одно- или многократной последовательной кольцевой электрошлаковой наплавки слоя металла заданного химического состава на центральный осевой слиток или поковку аналогичного химического состава (рис. 2), и обеспечении удовлетворительной однородной структуры в наплавленном слитке.

При использовании процесса ЭШНу металлическая ванна имеет минимальный объем, а двухфазная зона твердожидкого состояния — минимальную протяженность, позволяющую избежать образования дефектов ликвационного происхождения в нап-

Толщина наплавленных слоев металла при многократном укрупнении способом ЭШН ЖМ круглых стальных слитков массой до 100 т									
Исходный диаметр слитка D_0 , мм	Высота исходного слитка, мм	Диаметр слитка после первой наплавки D_1 , мм	Толщина наплавленного слоя после первой наплавки Δ_1 , мм	Диаметр слитка после второй наплавки D_2 , мм	Толщина наплавленного слоя после второй наплавки Δ_2 , мм	Диаметр слитка после третьей наплавки D_3 , мм	Толщина наплавленного слоя после третьей наплавки Δ_3 , мм	Диаметр слитка после четвертой наплавки D_4 , мм	Толщина наплавленного слоя после четвертой наплавки Δ_4 , мм
600	9000	846,0	123,0	1039	96,5	1200	80,5	1342	71,0
650	7680	916,5	133,0	1126	105,0	1300	87,0	1451	75,5
700	6600	987,0	143,5	1212	112,5	1400	94,0	1565	82,5
750	5800	1058,0	154,0	1300	121,0	1500	100,0	1674	87,0
800	5000	1131,0	165,5	1385	127,0	1600	107,5	1789	94,5
850	4500	1198,5	174,0	1472	137,0	1700	114,0	1900	100,0
900	4000	1269,0	184,5	1559	145,0	1800	120,5	2012	106,5
950	3600	1340,0	195,0	1645	152,5	1900	124,5	2120	110,0
1000	3250	1414,0	207,0	1732	159,0	2000	134,0	2236	118,0
1050	3000	1480,5	215,0	1819	169,0	2100	140,5	2348	124,0
1100	2680	1551,0	225,5	1905	177,0	2200	147,5	2460	130,0
1150	2450	1622,0	236,0	1992	185,0	2300	154,0	2571	135,5
1200	2260	1697,0	248,0	2078	190,5	2400	161,0	2683	141,5
1250	2000	1763,0	256,0	2165	201,0	2500	167,5	2795	147,5

Примечания: 1. Обозначения D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 и $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$, указанные в таблице, соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 3 2. Масса наплавленного металла каждого слоя одинакова для всех диаметров и равна массе исходного слитка (20 т).

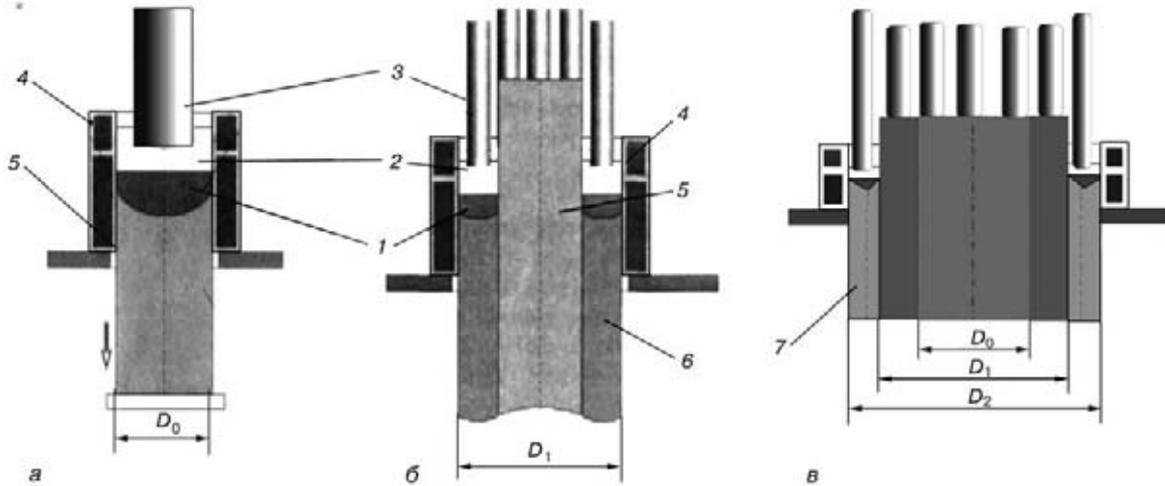


Рис. 2. Схема укрупнения круглых слитков по технологической схеме ЭШН с применением расходуемых электродов: *а* — выплавка исходного слитка; *б* — однократная ЭШН; *в* — двукратная ЭШН; 1 — металлическая ванна; 2 — шлаковая ванна; 3 — расходные электроды; 4 — токоподводящий кристаллизатор; 5 — слиток; 6, 7 — слои металла соответственно после одно- и двукратной наплавки

лавленном слое. Процесс ЭШНу может быть применен для изготовления как суперкрупных однородных, так и гетерогенных слитков и поковок из разных сталей и сплавов [7].

Для высоколегированных сталей и сплавов, склонных к сегрегации, толщина наплавленного слоя определяется, с одной стороны, техническими возможностями существующего оборудования для ЭШП, а с другой, — критическим размером кольцевого сечения металлического слоя наплавки, при превышении которого в металле развиваются нежелательные ликвационные процессы. Поэтому при необходимости увеличения сечения и массы крупных слитков из указанных материалов на основе процесса ЭШНу прежде всего следует оценить технические возможности существующего электрошлакового оборудования.

Нами проведен расчет (таблица) необходимой толщины слоев металла для нанесения путем многократной кольцевой электрошлаковой наплавки на исходные слитки разных диаметров (600... 1250 мм), но одинаковой массы (20 т), с целью получения укрупненных слитков ЭШП массой до 100 т при условии применения оборудования 20-тонной стандартной печи ЭШП, например ЭШП-20ВГ-И2, которыми оснащен электросталеплавильный цех МК «Азовсталь», или 20-тонной печи типа УШ-100 [8]. С целью использования основного оборудования 20-тонной печи ЭШП принято, что масса наплавленного металла каждого слоя должна быть одинаковой для всех диаметров и равняться массе исходного слитка (20 т). Для выполнения последнего ус-

ловия в расчетах исходили из тождественности площадей поперечного сечения 20-тонных первоначальных слитков соответствующих диаметров и площадей кольцевых поперечных сечений каждого наплавленного слоя. Это позволяет использовать для многократной последовательной наплавки слоев одинаковую электрическую мощность, не превышающую таковую для стандартной 20-тонной печи ЭШП.

Анализ расчетных данных (таблица), показал, что если для исходных слитков диаметром 600... 1250 мм толщина кольцевого наплавленного слоя после первой наплавки составляет 123... 256 мм, то после четвертой наплавки, при которой получают 100-тонный слиток, она уменьшается до 71,0... 147,5 мм.

Поскольку толщина наплавленного слоя определяется размером кольцевого зазора между поверхностью центрального слитка и формирующей по-

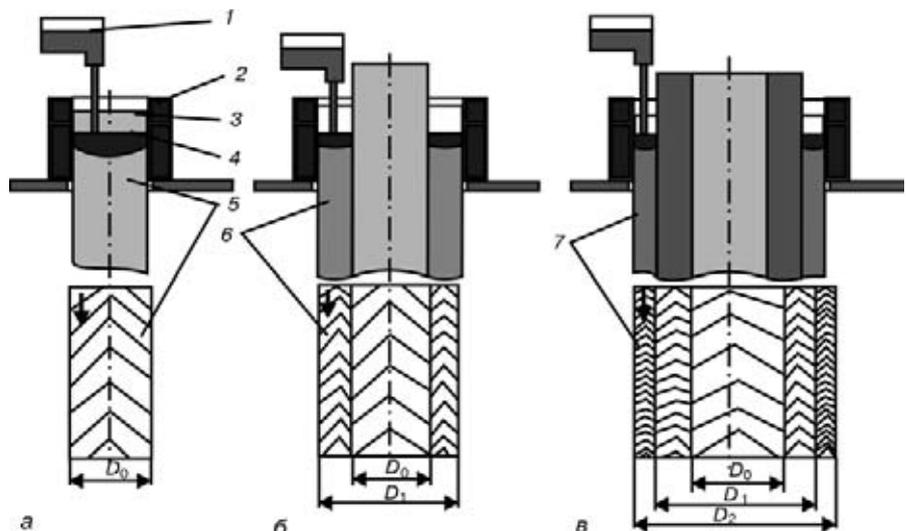


Рис. 3. Схема укрупнения круглых слитков по технологической схеме ЭШНу с применением ЖМ (верхний ряд) и схематическое изображение структуры продольного сечения исходного слитка (нижний ряд) (*а*), после одно- (*б*) и двукратной электрошлаковой наплавки (*в*): 1 — заливочное устройство для подачи ЖМ в кристаллизатор; 2 — токоподводящий кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — центральный слиток; 6, 7 — слои металла соответственно после одно- и двукратной наплавки

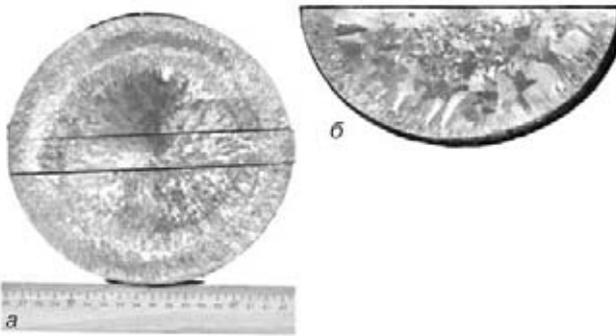


Рис. 4. Макроструктура поперечного сечения слитка ЭШП из высоколегированной стали типа 316L диаметром 170 мм: *а* – модельного, полученного в результате однократной наплавки по технологической схеме ЭШНу (рис. 3, *б*); *б* – контрольного, того же диаметра, изготовленного по технологической схеме (рис. 3, *а*)

верхностью кристаллизатора ЭШП, наплавка металла в таком малом промежутке с применением расходуемых электродов возможна только по схеме ЭШП, при которой реализуется встречное перемещение наплавленного слитка и короткого кристаллизатора с расширенной верхней (шлаковой) надставкой.

Для ЭШНу можно использовать ЭШН жидким металлом (ЭШН ЖМ) в сочетании с расходуемыми (или нерасходуемыми) электродами, или без них (при условии применения токоподводящего кристаллизатора, для которого расширенная верхняя надставка не требуется).

Для реализации ЭШН ЖМ нужно дополнительно оборудовать стандартную 20-тонную печь ЭШП специальным агрегатом для получения ЖМ требуемого химического состава, а также устройством для регламентированной заливки его в токоподводящий кристаллизатор (рис. 3).

Существует еще одна проблема, которую необходимо разрешить с целью реализации процесса ЭШНу на 20-тонной печи ЭШП, – это соответствующее усиление механизмов установки и удержания центральной заготовки в процессе многократной наплавки, когда ее диаметр и масса постепенно возрастают и достигают предельных размеров (диаметр 2795 мм, масса 100 т).

Следует также отметить, что центральный слиток при последовательной ЭШН каждого слоя иг-

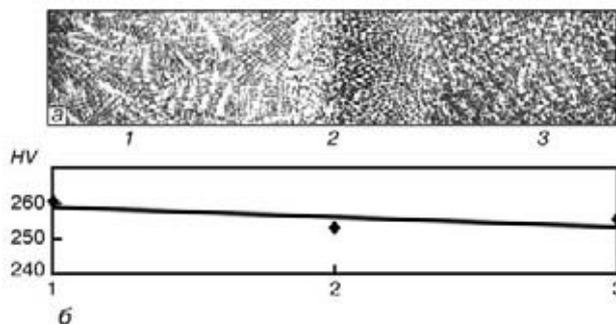


Рис. 5. Микроструктура (*а*) и микротвердость *HV* (*б*) зоны сплавления модельного слитка ЭШП диаметром 170 мм из высоколегированной стали типа 316L, полученного по технологической схеме ЭШНу (рис. 3, *б*); 1 – наплавленный слой; 2 – зона сплавления; 3 – центральная заготовка, $\times 50$

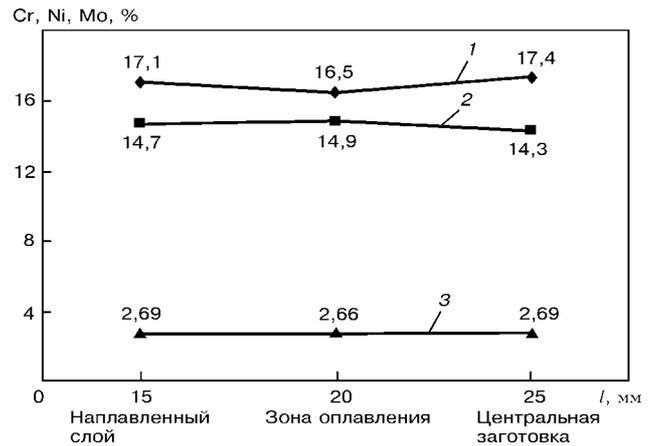


Рис. 6. Распределение хрома (1), никеля (2) и молибдена (3) в зоне сплавления модельного слитка ЭШП диаметром 170 мм из высоколегированной стали типа 316L, полученного по технологической схеме ЭШНу (рис. 3, *б*); 1 – протяженность зоны сплавления слоев в модельном слитке ЭШП

рает роль макрохолодильника, положительно влияющего на форму металлической ванны и структуру наплавленного металла. По мере увеличения с каждым наплавленным слоем диаметра центральной заготовки это влияние становится более существенным.

На рис. 4 представлены фрагменты макроструктуры поперечного сечения модельных слитков из высоколегированной стали типа 316L диаметром 170 мм, полученных по технологической схеме ЭШНу (рис. 3, *а*, *б*) и в результате однократной наплавки по технологической схеме ЭШНу (рис. 3, *б*). В качестве центральной заготовки для ЭШН ЖМ выбрали слиток ЭШП диаметром 110 мм из того же исходного металла.

Макро модельного слитка ЭШНу выделяется четким наличием границы между литым металлом центральной заготовки и наплавленным слоем. Толщина наплавленного слоя в поперечном сечении модельного слитка ЭШНу практически одинакова. При этом его структура отличается большей мелкозернистостью, особенно металл наплавленного слоя, по сравнению с контрольным слитком аналогичного диаметра, но полученного по стандартной технологии. Макро- и микроисследованиями (рис. 5) не выявлены какие-нибудь дефекты (трещины, шлаковые включения, отслоения и т. п.) в граничной зоне. Изучение распределения легирующих элементов (хрома, никеля, молибдена) и уровня микротвердости в граничной зоне (рис. 6) также свидетельствует о высокой гомогенности металла модельного слитка ЭШНу из высоколегированной стали типа 316L диаметром 170 мм.

Выводы

1. Путем численного расчета показана принципиальная возможность получения круглых стальных слитков массой до 100 т на базе 20-тонной печи ЭШП.

2. Определены основные геометрические параметры наплавленных слитков с применением про-



цесса ЭШНу в зависимости от диаметра исходного центрального слитка.

3. Проведенные экспериментальные исследования на модельных слитках ЭШНу диаметром 170 мм из высоколегированной стали типа 316L подтвердили высокий уровень гомогенности слитков ЭШНу, что свидетельствует о перспективности применения нового процесса ЭШНу при решении проблемы увеличения сечения и массы крупных слитков из высоколегированных сталей и сплавов, склонных к пятнистой ликвации, в том числе на базе современных 20-тонных печей ЭШП.

1. *Митчелл А.* Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 2. — С. 3–8.
2. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
3. *К вопросу* об электрошлаковой выплавке крупнотоннажных заготовок из высоколегированных специальных ста-

лей и сплавов / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1999. — № 2. — С. 26–30.

4. *Исследование* влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны // Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др. // Там же. — 2000. — № 4. — С. 3–7.
5. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я.* Повышение эффективности производства металла ЭШП // Там же. — 2002. — № 3. — С. 3–9.
6. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я.* / О некоторых «старых-новых» задачах ЭШП // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 7–10.
7. *ESR for the compound ingots for special bimetallic products* / L. B. Medovar, V. Ya. Saenko, Yu. M. Pomarin et al. // LMPC-2005: Proc. of the intern. conf. (Santa Fe, Sept. 18–21. 2005). — Santa Fe, 2005. — P. 715–731.
8. *Электрошлаковая технология в машиностроении* / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, И. Д. Нагаевский, А. Д. Чепурной. — Киев: Техніка, 1984. — 215 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 26.01.07

ЗАО «Титанспецмет» — компания, уверенно и динамично развивающаяся на рынке цветных металлов

- ➔ Продажа и закупка титанового металлопроката, полученного из разбронированного мобилизационного запаса Госрезерва
- ➔ Большой ассортимент сертифицированной титановой продукции следующей номенклатуры: лента, лист, плита, проволока, прутки, труба, а также теплообменное оборудование
- ➔ Весь спектр титановых марок (BT1-0, BT14, BT6, BT20, BT3-1, OT4 и т. д.)
- ➔ Широкая гамма продукции из стального и цветного проката
- ➔ Поставка продукции с собственного склада из наличия и под заказ
- ➔ Короткие сроки поставки
- ➔ Гибкая ценовая политика и удобная система оплаты заказанной продукции
- ➔ Качество продукции в полном соответствии с требованиями заказчика
- ➔ Основные заказчики — крупные предприятия оборонного комплекса, авиационной промышленности и машиностроения, а также предприятия нефтехимической отрасли и медицины

Приглашаем к сотрудничеству.

Россия, 443109, г. Самара, ул. Товарная, 8
www.titan-samara.ru