



УДК 669.187.526

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СЛИТКОВ СПЛАВОВ ТИТАНА

С. В. Ахонин¹, В. А. Березос¹, А. Н. Пикулин¹,
А. Ю. Северин¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua;

²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны и созданы специализированные электронно-лучевые установки УЭ-185 и УЭ-5810 с комплексом технологической оснастки, позволяющие выполнять процесс оплавления поверхностного слоя слитков как цилиндрического, так и прямоугольного сечений. Показана возможность безотходного удаления локальных поверхностных дефектов слитков сплавов титана способом электронно-лучевого оплавления, которое позволяет сократить потери основного металла и легирующих элементов. Приведены схемы электронно-лучевого оплавления слитков круглого и прямоугольного сечений. Показано, что разработанная технология электронно-лучевого оплавления слитков сплавов титана позволяет получать оплавленный слой, который по химическому составу незначительно отличается от основного металла и соответствует требованиям стандартов. Определены технико-экономические параметры электронно-лучевой обработки слитков титановых сплавов, при которых разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технология и специализированное оборудование для электронно-лучевого оплавления боковой поверхности слитков титановых сплавов позволяют увеличить выход годного металла на 4...15 % в зависимости от сортамента слитков, обеспечивают значительный экономический эффект. Библиогр. 11, табл. 2, ил. 7.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; слиток; титан; сплав; электронно-лучевое оплавление; дефекты; поверхность слитка; оплавленный слой; электронно-лучевая установка

Основными способами получения сплавов на основе титана являются вакуумно-дуговой (ВДП), электронно-лучевой (ЭЛП), плазменно-дуговой (ПДП) способы плавки. Вследствие особых физико-химических свойств титана (высокая температура плавления, чрезвычайно большая химическая активность по отношению к газам атмосферы при повышенных температурах, чувствительность к загрязнениям примесями внедрения и др.) при его производстве возникает ряд серьезных затруднений. Так, при изготовлении сплавов на основе титана традиционными способами плавки в поверхностном слое слитков и заготовок образуются грубые дефекты — трещины, разрывы, завороты, корки, раковины, гофры и прочие, причины возникновения которых достаточно хорошо изучены, однако предотвратить их появление при данном уровне производства практически невозможно.

В настоящее время необходимое качество поверхности слитков и заготовок достигается в результате удаления поверхностного слоя путем механической обработки. Однако операции зачистки и обдирки слитков очень трудо- и энергоемки. Следует отметить, что при механической обработке поверхности слитков сплавов на основе титана на су-

ществующих станках производительность в 3...6 раз ниже, чем при обработке легированных конструкционных сталей [1]. Также малая теплопроводность сплавов на основе титана приводит к локальному перегреву металла в месте контакта с резцом при механической обработке и, соответственно, к окислению стружки и повышенному расходу резцов. При производстве сплавов на основе титана из-за повышенных требований к чистоте исходных шихтовых материалов повторно используется только небольшая часть стружки.

Процесс повышения качества боковой поверхности слитков и заготовок за счет удаления дефектного поверхностного слоя является одним из лимитирующих звеньев металлургического цикла, характеризующегося высоким уровнем потерь металла в виде отходов (стружки, абразивного шлама), которые могут составлять до 20 % [2–4].

Решение проблемы безотходного удаления локальных поверхностных дефектов позволит сократить потери основного металла и ценных легирующих элементов, что обеспечит значительный экономический эффект.

Альтернативой серийной технологии удаления дефектного поверхностного слоя слитков и загото-



Рис. 1. Слитки диаметром 400 мм, оплавленные в электронно-лучевой установке УЭ-185

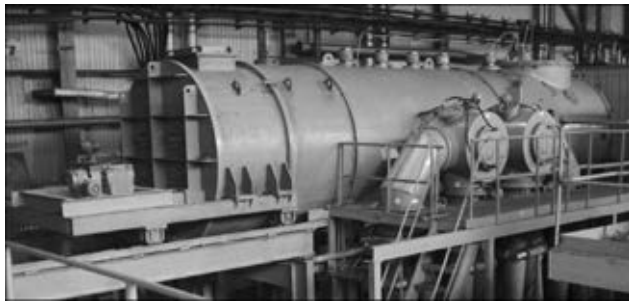


Рис. 2. Внешний вид универсальной многоцелевой электронно-лучевой установки УЭ-5810

вок титановых сплавов механическими способами стало применение способов обработки их поверхности концентрированными источниками нагрева — плазменной дугой, лазерными и электронными лучами, — а также электрошлаковая зачистка, которые позволяют избежать значительных потерь металла [5–8].

Наиболее эффективным источником концентрированного нагрева при обработке поверхности слитков и заготовок высокореакционных металлов и сплавов, в том числе титана, является электронный луч, имеющий ряд значительных преимуществ: наличие в печном пространстве вакуума — защитной и рафинирующей среды; высокая плотность подводимой энергии; прецизионность, легкость контроля и управления технологическими параметрами.



Рис. 3. Слиток диаметром 840 мм, оплавленный в электронно-лучевой установке УЭ-5810

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины вместо механической обработки применяют электронно-лучевое оплавление (ЭЛО) слитков [6]. Для реализации данного процесса разработана, смонтирована и пущена в эксплуатацию опытно-промышленная установка УЭ-185 [9] для электронно-лучевой обработки поверхностного слоя слитков цилиндрического и прямоугольного сечений (рис. 1). Конструктивно установка УЭ-185 представляет собой вакуумную камеру с механизмами, устройствами и системами, обеспечивающими проведение технологического процесса оплавления.

Техническая характеристика электронно-лучевой установки УЭ-185

| | |
|--|-------------------------------|
| Тип пушек | Аксиальные |
| Общая мощность, кВт | 1200 |
| Мощность ЭЛН, кВт | 900 |
| Ускоряющее напряжение, кВ | 30 |
| Количество пушек, шт. | 3 |
| Наибольшие размеры слитков, м: | |
| длина | 2 |
| диаметр | 0,85 |
| ширина к толщине | 1,0×0,42 |
| Рабочий вакуум в камере плавки, Па | (6,6...13,0)·10 ⁻² |

За одно вакуумирование электронно-лучевая установка УЭ-185 позволяет обрабатывать три слитка диаметром 110...250 мм, два слитка диаметром 300...500 мм, один слиток диаметром 600...850 мм либо один слиток-сляб.

Для оплавления слитков большого диаметра в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создана и пущена в эксплуатацию многоцелевая электронно-лучевая установка УЭ5810 (рис. 2).

Техническая характеристика электронно-лучевой установки УЭ-5810

| | |
|--|-------------------------------|
| Тип пушек | Аксиальные |
| Общая мощность, кВт | 5400 |
| Мощность ЭЛН, кВт | 1200 |
| Ускоряющее напряжение, кВ | 30 |
| Количество пушек, шт. | 4 |
| Наибольшие размеры слитков, м: | |
| длина | 4 |
| диаметр | 1,2 |
| Рабочий вакуум в камере плавки, Па | (6,6...13,0)·10 ⁻² |

Многоцелевая электронно-лучевая установка УЭ5810 позволяет оплавливать слитки диаметром 600...1200 мм, длиной до 4000 мм (рис. 3).

Процесс оплавления поверхности слитков цилиндрического сечения производится по технологической схеме, согласно которой электронный луч неподвижен, а слиток вращается вокруг своей оси (рис. 4).

Для оплавления слитков прямоугольного сечения использовали схему, при которой слиток неподвижен, а луч перемещается по оплавливаемой поверхности, причем перемещение луча осуществляется при помощи программатора или вручную. Оплавление поверхности производится за один-два прохода, после обработки одной плоскости слиток кантуется, затем обрабатывают оставшиеся плоскости (рис. 5).

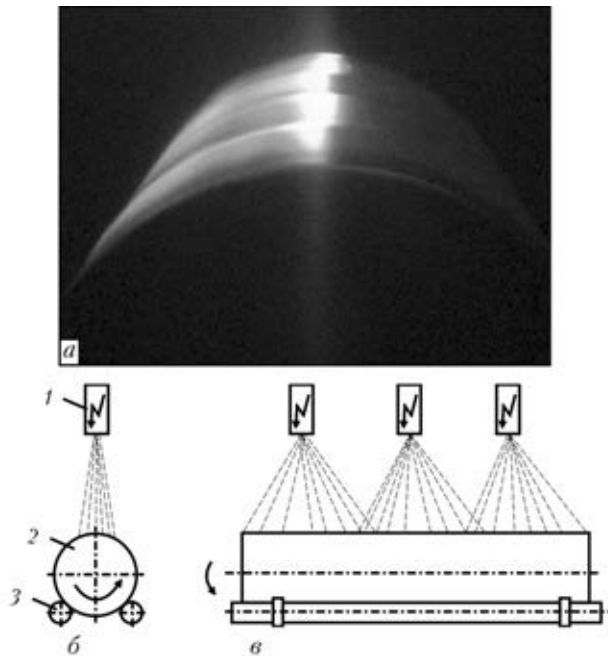


Рис. 4. Процесс оплавления слитка цилиндрического сечения: *a* – внешний вид; *б* – схема; 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – слиток; 3 – валки механизма вращения слитка

Процесс электронно-лучевой обработки поверхности слитков и заготовок осуществляется в высоком вакууме, поэтому его использование для сплавов титана, легирующие компоненты которых содержат легколетучие элементы (алюминий, хром и др.), сопряжено со сложностью поддержания требуемого состава оплаваемого поверхностного слоя. Поэтому технологию электронно-лучевого оплавления слитков титана и его сплавов создали на основе разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины математических моделей тепловых процессов в слитках круглого сечения [10] и процессов испарения легирующих элементов с поверхности ванны жидкого металла при ЭЛО [11], а также экспериментальной отработки предложенных в результате моделирования режимов оплавления слитков

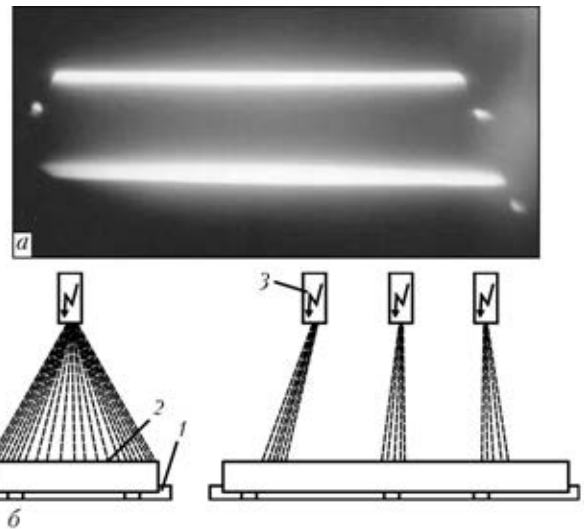


Рис. 5. Процесс оплавления плоского слитка: *a* – внешний вид; *б* – схема; 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – слиток; 3 – рама механизма вращения

сплавов титана, проведенных способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью.

Разработанная технология позволяет получать оплавленный слой, по химическому составу существенно отличающийся от основного металла и соответствующий требованиям стандартов (табл. 1).

Боковая поверхность слитков после оплавления приобретает ровный микрорельеф, имеет гладкий зеркальный вид без видимых трещин, разрывов и неслитин. Шероховатость поверхности находится в пределах 3...4 классов при волнистости поверхности, равной 0,2...0,6 мм (рис. 6).

Таким образом, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона технология ЭЛО и оборудование для ее реализации позволяют эффективно удалять поверхностные дефекты на глубину до 10 мм, обеспечивая при этом качество боковой поверхности и соответствие химического состава оплавленного слоя требованиям стандартов (рис. 7).

| Таблица 1. Содержание химических элементов в оплавленном слое слитков исследованных титановых сплавов, мас. % | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|-------|-------|
| Титановый слиток | Al | Cr | V | Mo | Zr | Nb | O | N |
| Сплав ВТ6 диаметром 600, мм: | | | | | | | | |
| ГОСТ 19807-91 | 5,3...6,8 | – | 3,5...5,3 | – | ≤0,3 | – | ≤0,20 | ≤0,05 |
| Исходный | 6,18 | – | 3,86 | – | – | – | 0,024 | 0,018 |
| ЭЛО | 5,74 | – | 4,02 | – | – | – | 0,046 | 0,031 |
| Сплав ВТ20 диаметром 400, мм: | | | | | | | | |
| ГОСТ 19807-91 | 5,5...7,0 | – | 0,8...2,3 | 0,5...1,8 | 1,4...2,5 | – | ≤0,15 | ≤0,05 |
| Исходный | 6,9 | – | 2,05 | 1,57 | 1,81 | – | 0,066 | 0,011 |
| ЭЛО | 6,48 | – | 2,14 | 1,63 | 1,78 | – | 0,078 | 0,019 |
| Сплав ВТ22 диаметром 150, мм: | | | | | | | | |
| ГОСТ 19807-91 | 4,4...5,7 | 0,5...1,5 | 4,0...5,5 | 4,0...5,5 | ≤0,3 | – | ≤0,18 | ≤0,05 |
| Исходный | 5,6 | 0,78 | 4,24 | 4,1 | – | – | 0,050 | 0,011 |
| ЭЛО | 5,22 | 0,51 | 4,31 | 4,53 | – | – | 0,062 | 0,014 |

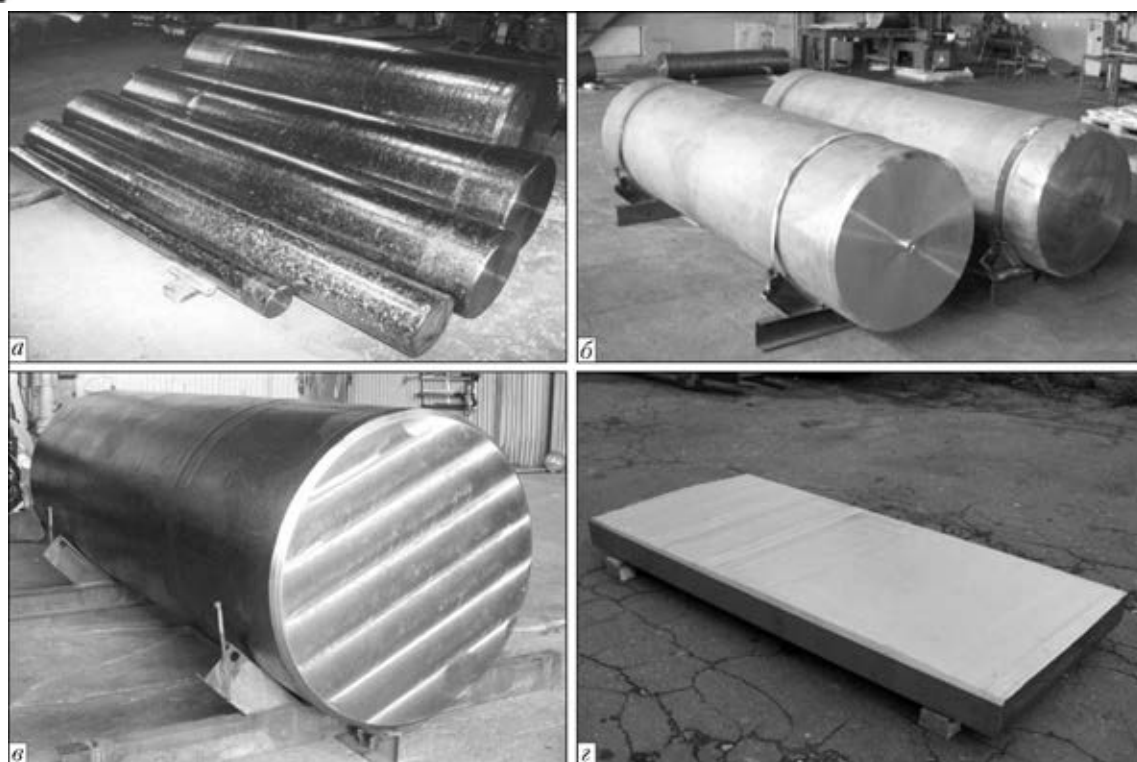


Рис. 6. Внешний вид слитков титановых сплавов с оплавленной поверхностью диаметром 110...600 (а); 840 (б); 1100 (в); слиток-сляб 960×165×2000 (z) мм

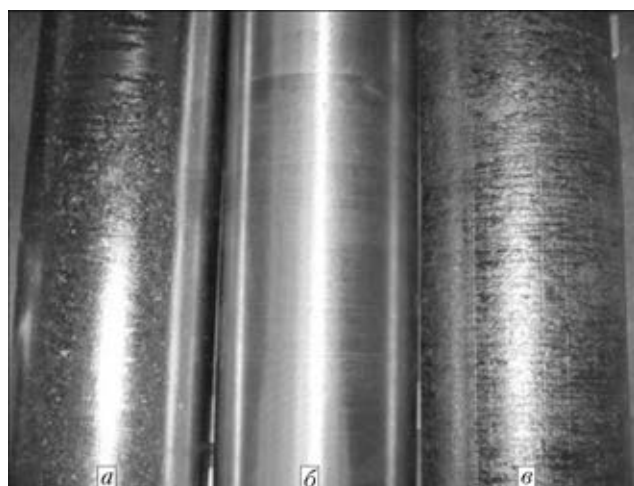


Рис. 7. Внешний вид поверхности слитков титана: а — оплавленной; б — механически обработанной; в — литой слиток

Применительно к разработанной специализированной электронно-лучевой установке для оплавления слитков УЭ185 определены технико-экономи-

ческие показатели электронно-лучевой обработки слитков титановых сплавов цилиндрического сечения диаметром 165, 400, 600 мм, а также прямоугольного сечения 940×165 мм.

Технико-экономическую эффективность технологии ЭЛО слитков титановых сплавов оценивали путем сравнения удельного расхода электроэнергии и выхода годного металла слитка при различных способах обработки поверхности (табл. 2). Показатели расхода электроэнергии при механической обработке и ЭЛО определяли по укрупненным статьям. Они соответствовали фактическим данным опытно-промышленного производства слитков титановых сплавов.

Сравнительный анализ технологий удаления дефектного поверхностного слоя слитков сплавов титана показал, что расход электроэнергии при механической обработке в 2...3 раза ниже, чем у предложенной технологией ЭЛО. Однако технология ЭЛО позволяет увеличить выход годного металла от 4 до 15 % (в зависимости от сортамента

Таблица 2. Технико-экономические показатели обработки поверхности слитков титановых сплавов

| Размер слитка, мм | Масса слитка длиной 2 м, кг | Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг | | Выход годного металла, % | | Экономия металла при ЭЛО, кг |
|-------------------|-----------------------------|--|------------|--------------------------|------------|------------------------------|
| | | Механическая обработка | Оплавление | Механическая обработка | Оплавление | |
| 165 | 195 | 0,62 | 0,71 | 85...90 | 100 | 20...30 |
| 400 | 1130 | 0,20 | 0,39 | 94,0...95,5 | 100 | 50...70 |
| 600 | 2540 | 0,10 | 0,18 | 94,5...96,0 | 100 | 100...140 |
| 940×165 | 1390 | 0,25 | 0,72 | 90,6...92,0 | 100 | 110...130 |



слитков), что значительно перекрывает затраты на электроэнергию, а в случае обработки сплавов титана обеспечивает значительный экономический эффект.

1. Созинов А. И., Строишков А. Н. Повышение эффективности черновой обработки заготовок из титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1990. — 206 с.
2. Альперович М. Е. Вакуумный дуговой переплав и его экономическая эффективность. — М.: Металлургия. — 1978. — 168 с.
3. Корягин С. И., Пименов И. В., Худяков В. К. Способы обработки материалов: Учеб. пособие. — Калининград, 2000. — 448 с.
4. Зыкин А. С. Влияние химического состава титановых сплавов на некоторые показатели их обрабатываемости резанием. — Уфа, 1982. — С. 3–8.
5. О возможности использования электронно-лучевого и плазменно-дугового нагрева для обработки поверхностного слоя заготовок с грубыми дефектами / Г. А. Шилов, Э. Л. Вржижевский, А. В. Лихобаба и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 3. — С. 58–63.
6. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 250 с.
7. К вопросу о плазменно-дуговом переплаве поверхностного слоя слитков вакуумно-дугового переплава / Ю. Л. Латаш, Г. Ф. Торхов, Ю. И. Моделкин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1983. — Вып. 18. — С. 75–79.
8. Лазерная обработка поверхности титана и его сплавов в атмосфере азота / Ю. М. Помарин, В. Ю. Орловский, Б. И. Медовар и др. // Там же. — 1992. — № 2. — С. 102–106.
9. Электронно-лучевая установка для оплавления поверхностного слоя слитков / Н. П. Тригуб, Г. В. Жук, А. Н. Пикулин и др. // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 12–14.
10. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев.: Наук. думка, 1997. — 265 с.
11. Ахонин С. В., Миленин А. С., Пикулин А. Н. Моделирование процессов испарения легирующих элементов при электронно-лучевом оплавлении поверхности цилиндрических слитков из сплавов на основе титана // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 32–35.

At the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine the specialized electron beam installations UE-185 and UE-5810 with a complex of technological equipment have been designed and manufactured, which allow realizing the process of melting of surface layer of ingots both of cylindrical and rectangular sections. Feasibility of wasteless removal of local surface defects of ingots of titanium alloys by the method of electron beam melting is shown, thus reducing the losses of base metal and alloying elements. Schemes of surface electron beam melting of ingots of round and rectangular sections are given. It is shown that the developed technology of electron beam surface melting of ingots of titanium alloys can produce a surface layer which differs negligibly from base metal by chemical composition and corresponds to the requirements of standards. Determined are the technical-economical parameters of electron beam treatment of ingots of titanium alloys, at which the technology and specialized equipment for electron beam of melting of lateral surface of ingots of titanium alloys, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, allow increasing the yield of efficient metal by 4...15 % depending on the assortment of ingots and providing the significant economic efficiency. Ref. 11. Tables 2, Figures 7.

Key words: *electron beam melting; ingot; titanium; alloy; electron beam surface melting; surfaced layer; electron beam installation*

Поступила 28.02.2014

ПАРТИЯ ВАЛКОВ ДЛЯ МЕТКОМБИНАТОВ «ArcelorMittal»



ПАО «Энергомашспецсталь» (ЭМСС) изготовит большую партию валков для крупнейшей металлургической корпорации мира «ArcelorMittal», с которой украинское предприятие сотрудничает с 2011 года.

Объектами поставки станут четыре металлургических комбината, входящие в группу компаний «Falt Carbon Europe»: «ArcelorMittal Poland» (Польша), «ArcelorMittal Fos-sur-Mer» (Франция), «ArcelorMittal Bremen» (Германия) и «ArcelorMittal Gent» (Бельгия).

Для этих предприятий ЭМСС произведет опорные валки для станов горячей прокатки общей массой 376 т.

Особое внимание будет уделено комбинатам, расположенным в Бремене (Германия) и Кракове (Польша), поскольку валки для этих предприятий пройдут дополнительный контроль на перепады твердости в рабочем слое бочки валков. Это требование заказчика, успешное выполнение которого усилит конкурентные преимущества предприятия перед аналогичными европейскими и американскими производителями валков и позволит наполнять портфель заказов ЭМСС в последующие периоды.

Поставка изделий запланирована на вторую половину 2014 года.

<http://www.krampravda.dn.ua>