



УДК 669.117.56

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ЗОНЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО СЛИТКА–ЗАГОТОВКИ АНОДА ДСП ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. А. Зайцев¹, А. А. Полишко¹, Л. А. Романко²

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

²Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины.
04074, Киев, ул. Автозаводская, 2. E-mail:alcon@ism.kiev.ua

Представлено исследование удельного электрического сопротивления зоны сплавления биметаллического сталемедного слитка–заготовки анода дуговой сталеплавильной печи постоянного тока. Слиток изготовлен по разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона технологии электрошлакового переплава по двухконтурной схеме. Для исследования удельного электрического сопротивления вдоль оси слитка вырезан темплет, посередине которого в районе сплавления стали с медью отобраны испытываемые образцы. Использовали методику измерения электропроводности материалов, основанную на регистрации падения напряжения на образце в зависимости от тока, проходящего через образец. Для учета влияния температуры нагрева анода в процессе его эксплуатации на печи проведены исследования удельного электрического сопротивления сталемедных образцов. Показано, что уровень удельного электрического сопротивления сталемедной зоны остается практически неизменным как при комнатной, так и при повышенных эксплуатационных температурах, что может свидетельствовать об отсутствии локального перегрева во время эксплуатации анода из-за разных значений электрического сопротивления металлов на границе сталь–медь и, таким образом, о стабильной работе анода, изготовленного из указанного материала. Библиогр. 9, ил. 11.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление; двухзондовый метод измерения; зона соединения сталь–медь; биметаллический слиток; электрошлаковый переплав по двухконтурной схеме; анод; дуговая печь постоянного тока

Анод (подовый электрод) — важнейший элемент конструкции дуговой печи постоянного тока. Современные аноды изготавливают различными способами, в том числе из литого металла биметаллических сталемедных слитков [1]. Верхняя стальная часть анода контактирует с расплавленным металлом, а нижняя (медная) располагается ниже плавильной зоны, охлаждается водой и к ней с помощью кабелей подключено силовое питание. На рис. 1 показано схематическое расположение анода в подине дуговой сталеплавильной печи (ДСП) постоянного тока.

Одним из важных условий стабильной работы биметаллического анода является уровень его удельного электрического сопротивления, поскольку в процессе эксплуатации через него проходит ток в десятки тысяч ампер. В настоящей работе изучали значение удельного электрического сопротивления зоны соединения в биметаллическом сталемедном слитке–заготовке анода. Слиток изготавливали по разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Па-

тона технологии электрошлакового переплава по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) [2–4].

Для изучения удельного электрического сопротивления вдоль по оси выплавленного сталемедного слитка вырезали темплет, посередине которого отбрали три образца (№ 4–6) длиной по 120 мм, сечением 14×14 мм каждый, которые охватывали как медную, так и стальную части слитка (рис. 2).

Методика измерения электропроводности материалов основана на регистрации падения напряжения на образце в зависимости от значения тока, проходящего через образец [5]. Для определения удельного сопротивления вдоль слитков правильной геометрической формы в виде прямоугольного бруска использовали двухзондовый метод измерения (рис. 3).

На его торцах по всей площади между образцом и токоподводящими электродами изготавливали омические контакты из индия, через которые вдоль образца пропускали постоянный ток, значение кото-

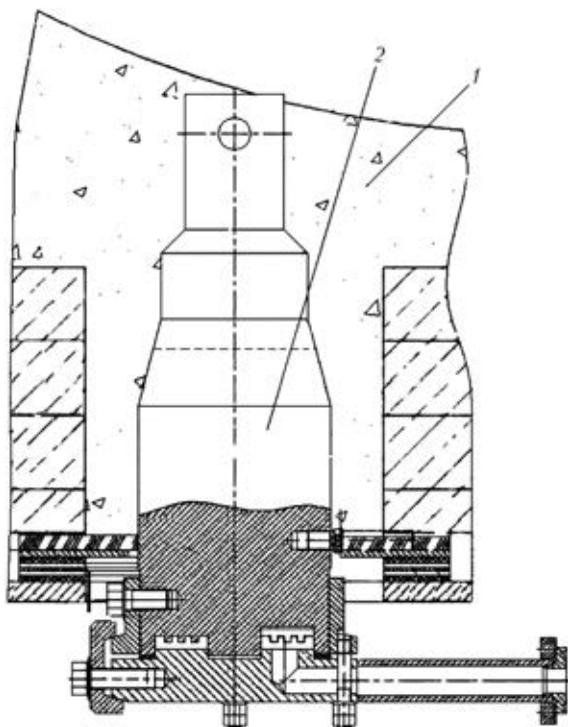


Рис. 1. Схематическое расположение анода в подине ДСП постоянного тока: 1 – футеровка подины печи; 2 – анод

рого устанавливали по амперметру. Падение напряжения измеряли с помощью двух зондов, выполненных в виде рамок из посеребренной проволоки, охватывающей образец по периметру сечения, которые перемещаются вдоль линии тока. Такая конфигурация зондов дала возможность усреднить значение потенциала по сечению образца. Расстояние между измерительными зондами в процессе измерения оставалось неизменным. Таким образом, исследуемый образец условно разбивали на равные участки, ограниченные зондами, в пределах которых образец считали однородным, а его усредненное удельное электрическое сопротивление определяли как

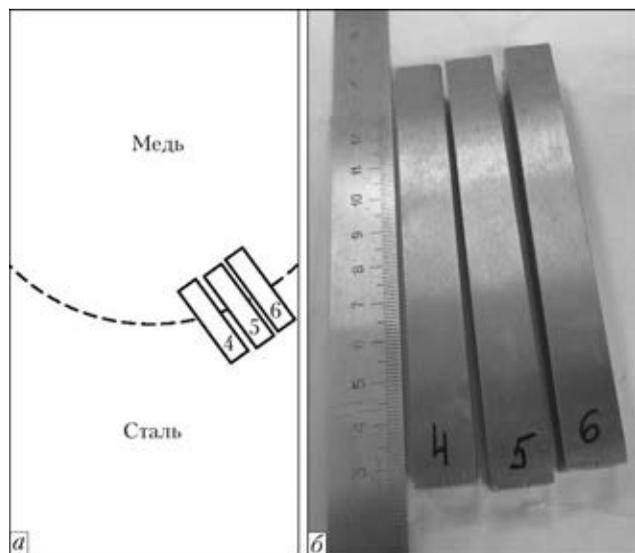


Рис. 2. Схема вырезки (а) и общий вид (б) образцов № 4–6 из сталемедного слитка

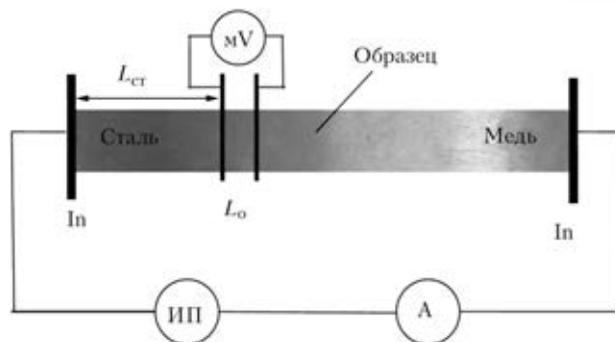


Рис. 3. Схема измерения электрического сопротивления сталемедных образцов: ИП – источник питания; А – амперметр; mV – милливольтметр

$$\rho = \frac{U}{I} \frac{S}{L_0},$$

где I – постоянный ток, протекающий через образец; U – разность потенциалов между измерительными зондами; L_0 – расстояние между зондами; S – площадь поперечного сечения образца. Погрешность измерения двухзондовым методом на образцах правильной геометрической формы зависит преимущественно от точности измерения геометрических размеров образца и расстояния между зондами, составляющего 1...3 %.

Результаты измерения зависимости удельного электрического сопротивления участков образцов от расстояния измерительных зондов до начала отсчета, привязанного к стальному концу, показаны на рис. 4.

В целом удельное электрическое сопротивление образцов при переходе от стали к меди плавно изменялось в пределах от $1,86 \cdot 10^{-7} \dots 2,08 \cdot 10^{-7}$ до $4 \cdot 10^{-8} \dots 6,02 \cdot 10^{-8}$ Ом·м для разных образцов. Согласно справочным данным удельное электрическое сопротивление стали должно составлять $13 \cdot 10^{-8}$, меди – $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [6, 7].

В ходе исследований обнаружено, что на результаты измерений существенное влияние оказывает контактное сопротивление между образцом и изме-

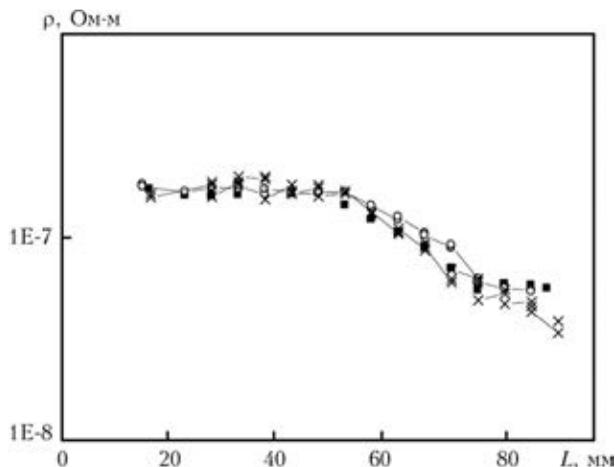


Рис. 4. График изменения удельного электрического сопротивления ρ сталемедных образцов № 4 (X), 5 (■) и 6 (○) в зависимости от расстояния измерительного электрода L до начала отсчета, привязанного к стальному концу

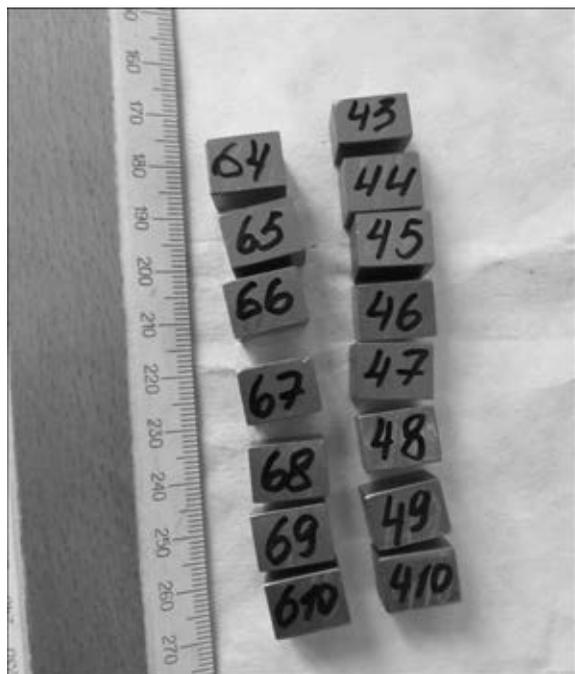


Рис. 5. Сталемедные образчики

рительными электродами, которое изменяется в зависимости от уровня усилия прижатия последних и вносит некоторую погрешность в результаты определения удельного электрического сопротивления.

Для учета этих особенностей и оценки погрешности измерения удельного электрического сопротивления исходные образцы № 4 и 6 разделили на равные части (образчики) длиной по 10 мм каждый, измерено их объемное электрическое сопротивление при различном заданном усилии прижатия. Образцы промаркировали следующим образом: первая цифра – номер исходного образца, последующая – порядковый номер вырезанного образчика. Например, образец 68 означает восьмой образчик, вырезанный из шестого исходного образца (рис. 5). Следует отметить, что образцы 67 и 47 визуально имели переход от меди к стали.

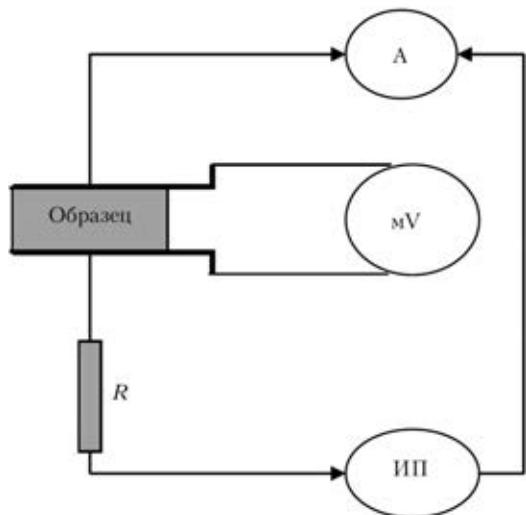


Рис. 6. Схема измерения электрического сопротивления сталемедных образцов: ИП – источник питания; А – амперметр; mV – милливольтметр

Измерение электрического сопротивления образцов проводили согласно измерительной схеме (рис. 6).

Для сохранения условий измерения и уменьшения контактного сопротивления на торцы образцов наносили индий. Удельное электрическое сопротивление рассчитывали с учетом геометрических размеров электродов по формуле

$$\rho = \frac{U S}{I h},$$

где U – падение напряжения на образце; I – ток, проходящий через образец; S – площадь электрического контакта; h – толщина образца.

Результаты измерения удельного электрического сопротивления в зависимости от усилия прижатия электродов для образцов серии 4 показаны на рис. 7.

Согласно полученным результатам из-за изменения контактного сопротивления значения удельного электрического сопротивления образцов уменьшались с увеличением усилия прижатия измерительных электродов на 75...80 %. Поэтому дальнейшие измерения электрического сопротивления образцов проводили при одинаковом усилии сжатия 12...13 МПа.

На рис. 8 представлены результаты измерения удельного электрического сопротивления образцов серий 4 и 6.

Согласно результатам измерений тенденция изменения усредненного удельного электрического сопротивления совпадала с таковой при двухзондовом методе (рис. 3). Количественное значение отличалось и существенно зависело от уровня контактного сопротивления на границе с измерительным электродом (рис. 7).

В процессе эксплуатации анод в печи нагревается. По некоторым данным температура нагрева в районе переходной сталемедной зоны в зависимости от конструкции анода и вводимой во время переплава мощности может достигать 450...500 °С [8, 9]. Это может приводить к снижению его электропроводности. Для учета влияния температуры нагрева анода проведены исследования удельного

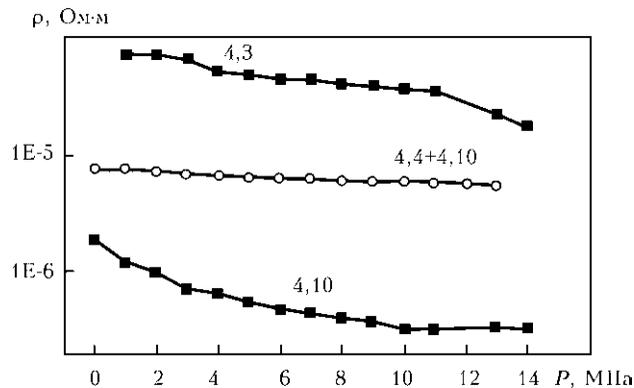


Рис. 7. График изменения удельного электрического сопротивления сталемедных образцов серии 4 в зависимости от усилия ρ прижима измерительных электродов

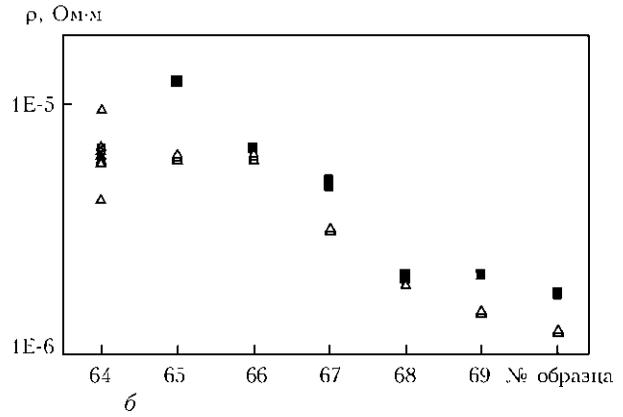
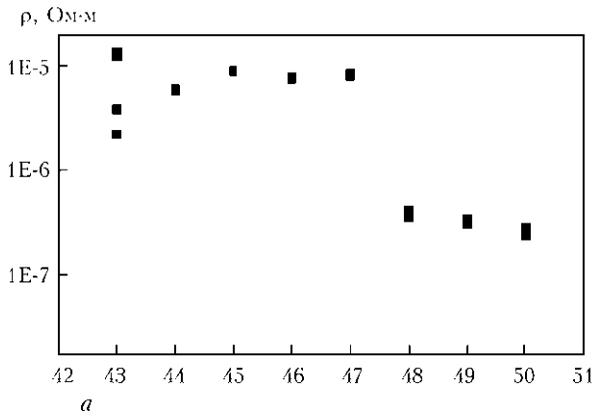


Рис. 8. Удельное электрическое сопротивление образцов № 4 (а) и 6 (б) при усилии сжатия, МПа: ■ – 10; Δ – 13



Рис. 9. Образец на подложке, подготовленный к измерению электросопротивления при различных температурах

электрического сопротивления сталемедных образцов при повышенных температурах. С целью определения электрического сопротивления образцов использовали стенд, смонтированный на базе ВУП-5, который обеспечил измерения при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Па в широком интервале напряжений и температур (рис. 9). Для определения показаний тока использовали электрометр В7-49, позволяющий регистрировать токи $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-13}$ А. Значение падения напряжения на образце измеряли при помощи нановольтметра NV-724 в интервале напряжений $1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ В.

Результаты измерения электрического сопротивления образцов в зависимости от температуры приведены на рис. 10, 11.

Поскольку прижим измерительных электродов к образцу был небольшой, примерно 1 МПа, то в процессе первоначального нагрева определяющее влияние на значение удельного электрического сопротивления образцов оказывало контактное сопротивление, которое уменьшалось с повышением температуры. При повторном нагреве образца удельное электрическое сопротивление образца мало изменялось в зависимости от температуры и определялось свойствами материала.

Исследования сталемедных образцов, вырезанных из заготовки анода дуговой сталеплавильной печи постоянного тока, выплавленной способом

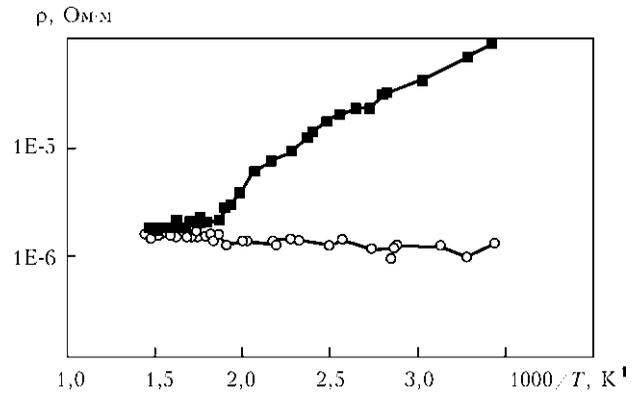


Рис. 10. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления образцов № 4.7 при повторных температурных измерениях: ■ – первый нагрев; ○ – повторный

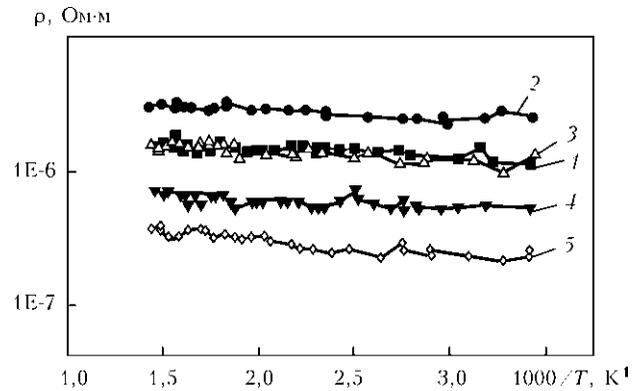


Рис. 11. Результаты измерения удельного электрического сопротивления образцов сталемедного образца серий 4 (1 – 4,4; 2 – 4,6; 3 – 4,7; 4 – 4,8; 5 – 4,10) в зависимости от температуры

ЭШП ДС показали, что значение удельного электрического сопротивления сталемедной зоны остается практически неизменным как при комнатной, так и при повышенных эксплуатационных температурах. Это может свидетельствовать об отсутствии локального перегрева во время эксплуатации анода несмотря различие значений электрического сопротивления металлов на границе сталь–медь, а также о стабильной работе анода.

1. Зайцев В. А., Медовар Л. Б. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока // Современ. электрометаллургия. – 2009. – № 2. – С. 3–8.
2. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока



- янного тока // В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар, П. И. Тищенко и др. // Там же. — 2011. — № 2. — С. 3–7.
3. *Двухконтурная* схема электрошлакового переплава расходуемого электрода // А. К. Цыкуленко, И. А. Ланцман, Л. Б. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 3. — С. 16–20.
 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. *Панов Л. П.* Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высш. шк., 1975. — 206 с.
 6. http://ru.wikipedia.org/wiki/Удельное_электрическое_сопротивление
 7. *Енохович А. С.* Краткий справочник по физике. — М.: Высш. шк., 1976. — 288 с.
 8. *DC-EAF: The anodes* // M. Pavlicevic, B. Matijasevic, A. Della, G. Gensini // Danieli News. — 1996. — № 1. — С. 25–29.
 9. *Экспериментальное* исследование теплового состояния подового электрода // М. Я. Каплун, М. М. Крутянский, В. Д. Азбукин, В. Г. Евченко // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1978. — № 35. — С. 137–142.

A study of specific electric resistance of fusion zone of bimetal steel-copper ingot-billet of D.C. arc steel furnace anode is presented. The ingot is produced by the technology of electroslag remelting by a two-loop circuit developed by PWI. To study specific electric resistance, a template was cut out along the ingot axis, in the middle of which in the region of steel fusion with copper samples were taken for testing. Procedure of measurement of material electric conductivity, based on recording voltage drop in the sample, depending on current flowing through the sample, was used. Investigations of specific electric resistance of steel-copper samples were performed to allow for the influence of anode heating temperature during its operation in the furnace. It is shown that the level of specific electric resistance of steel-copper zone remains practically unchanged, both at room, and at increased service temperatures that may be an indication of absence of local overheating during anode operation, because of different values of electric resistance of metals on steel-copper interface, and, thus, of stable operation of anode made from the above materials. 9 Ref., 11 Figures.

Keywords: *specific electric resistance; two-probe measurement method; steel-copper joint zone; bimetal ingot; electroslag remelting by two-loop circuit; anode; D.C. arc furnace*

Поступила 30.12.2013

ОБОРУДОВАНИЕ НКМЗ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ



Новокраматорский машиностроительный завод (г. Краматорск Донецкой обл.) завершил изготовление первой партии рам гондол – скелетов турбин ветроэнергетических установок (ВЭУ), заказанных украинским предприятием Fuhrlander Wind Technology (FWT) г. Краматорска.

Отгрузив ранее три из восьми предусмотренных заключенными контрактами рам, НКМЗ подготовил к отправке адресату еще пять и таким образом подтвердил свою профессиональную готовность дальнейшего участия в крупном отечественном проекте по получению энергии из возобновляемых источников.

Напомним, рама является основным элементом гондолы, устанавливаемой на башне ВЭУ и вмещающей в себя сложнейшие узлы и агрегаты для получения электроэнергии ветра. Изготовление каждой из 34-тонных рам осуществляли на уровне производства часового механизма.

Произведенные на НКМЗ рамы для ВЭУ предназначены для ветропарков, являющихся альтернативными источниками энергии.

<http://www.nkmz.com>