



УДК 669.117.56

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНЫХ ПОЛЫХ СЛИТКОВ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ СПОСОБОМ ЭШН ЖМ

В.И. Махненко, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко,
А.А. Полишко, Б.Б. Федоровский, С.Г. Григоренко, В.А. Зайцев

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

Производство толстостенных корпусов реакторов для атомной энергетики и нефтеперерабатывающей промышленности характеризуется длительным рабочим циклом, значительной трудоемкостью, большим расходом корпусного легированного металла и сварочных материалов. Для его реализации требуется уникальное кузнечно-прессовое, прокатное и сварочное оборудование. Для изготовления корпусов как ковано-, так и штампованных необходимы слитки массой 100...200 т и более, а выход годного иногда не превосходит 30...40 %. Новые возможности для получения полых высококачественных заготовок для корпусов реакторов открываются благодаря разработанному в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины технологическому процессу получения крупных слитков, основанному на электрошлаковой наплавке жидким металлом (ЭШН ЖМ). Представлены результаты моделирования процесса изготовления крупных полых слитков из высоколегированной стали типа AISI 316 способом ЭШН ЖМ. Математическое моделирование показало, что путем кольцевого наплавления слоев металла можно получать не только сплошные слитки, но и полые. Количество наплавляемых слоев зависит от заданных размеров и массы слитков. Металлографические исследования на модельных слитках подтвердили высокую структурную и химическую однородность зоны сплавления металла. При этом ЭШН ЖМ позволяет получать полые слитки как одного химического состава, так и гетерогенные. Библиогр. 11, ил. 5.

Ключевые слова: ЭШН ЖМ; энергетическое машиностроение; нефтехимическое машиностроение; корпус реактора; математическое моделирование; полый слиток; высоколегированная сталь; модельный слиток; зона сплавления

Корпуса атомных энергетических и нефтехимических реакторов изготавливают с применениемковки, вальцовки, штамповки. В зависимости от способа применяют кузнечные слитки или толстолистовой прокат [1–4].

Производство корпусов реакторов включает два технологических варианта — ковано- и штамповарные. Для производства кованосварных корпусов, во-первых, необходимо отливать слитки массой 100...200 т и более, а значит, и большого диаметра, что сопровождается образованием в слитках дефектов ликвационного происхождения, недопустимых при производстве заготовок для корпусов реакторов. Во-вторых, эти слитки подлежат сложному переделу для изготовления полых заготовок (биллетировка, осадка, прошивка, раскатка или расовка

полой заготовки). Это приводит к нерациональному расходу металла, отличается значительной трудоемкостью и, главное, требует уникального кузнечно-прессового оборудования. При этом коэффициент использования металла (КИМ) иногда не превышает 30...40 % (рис. 1).

Толстостенные обечайки (толщина стенки 50...150 мм) выполняют с применением штамповки или вальцовки плоских заготовок из толстолистового проката. Существенным недостатком штамповарного варианта производства корпусов является наличие двух продольных сварных швов, что недопустимо в корпусах современных атомных энергетических реакторов. Обечайки с толщиной стенки свыше 150 мм обычно изготавливают способамиковки

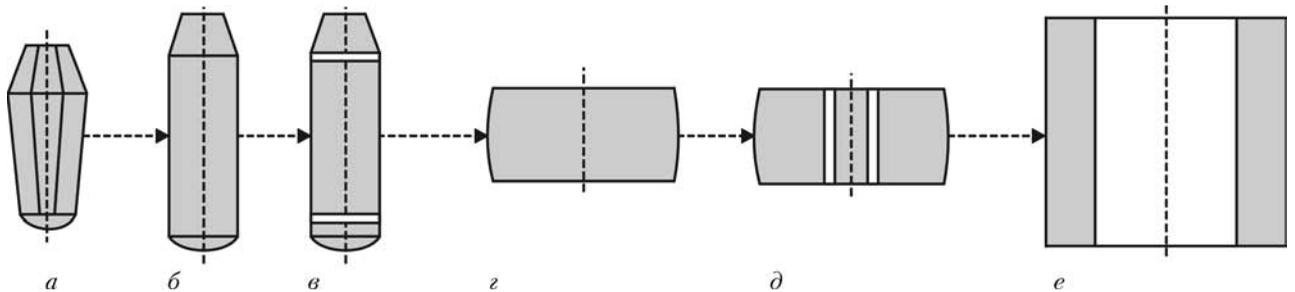


Рис. 1. Схема производства кованных полых заготовок: *a* – исходный слиток; *b* – билетировка; *c* – отрубка прибыльной и донной частей слитка; *d* – осадка слитка; *e* – прошивка (удаление центральной части); *e* – заготовка после продольной протяжки

стальных слитков массой 100...200 т и более, для чего требуется уникальное оборудование [5–7].

Обечайку куют на прессах мощностью 3000...12000 т и более, возможна в перспективе и раскатка на кольцевом стане*.

Ковано- и штампосварные технологические варианты характеризуются длительным рабочим циклом, значительной трудоемкостью, большим расходом корпусного легированного металла и сварочных материалов, требуют для своей реализации использование уникального кузнечно-прессового, прокатного, кузнечно-штамповочного и сварочного оборудования. Стоимость кованных корпусов реакторов огромна, изготовление их под силу только весьма крупным машиностроительным предприятиям, имеющим мощную металлургическую базу.

Корпус реактора является одним из важнейших критических элементов, определяющих ресурс атомных энергетических установок. При этом надо

учитывать, что в процессе эксплуатации изменяются свойства металла корпуса, обусловленные радиационным и тепловым воздействием рабочей среды, прежде всего повышается критическая температура хрупкости металла [8].

Новые возможности для получения полых высококачественных заготовок для нужд энергетического и нефтехимического машиностроения предоставляет разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона новый технологический процесс получения крупных слитков способом кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом (ЭШН ЖМ) [9] на центральный слиток, который может быть как сплошного сечения, так и полым (рис. 2). Способом ЭШН ЖМ возможно изготовление слитков и одного химического состава, и гетерогенных [10].

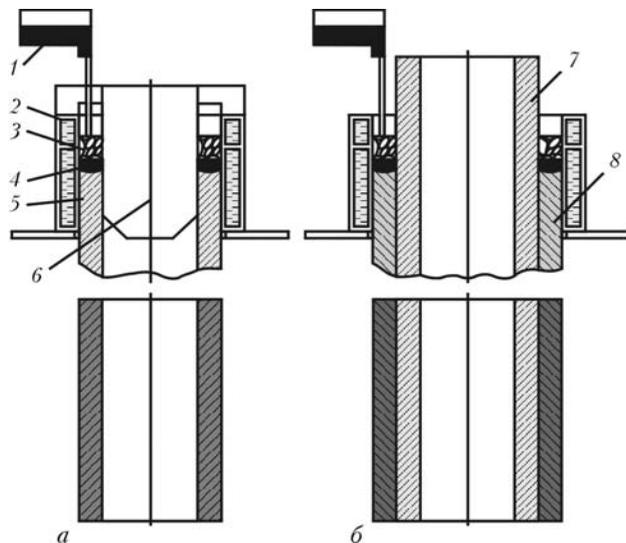


Рис. 2. Схема получения полых слитков способом ЭШН ЖМ: *a* – центральный слиток под наплавление; *b* – полая заготовка после наплавления ЭШН ЖМ: 1 – заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 – токоподводящий кристаллизатор; 3 – шлаковая ванна; 4 – металлическая ванна; 5 – водоохлаждаемый дорн для формирования полого слитка; 6 – стенка полого слитка, наплавленного на сплошной слиток; 7 – центральный полый слиток (труба); 8 – слой металла, наплавленный на трубу (КИМ может превышать 80%)

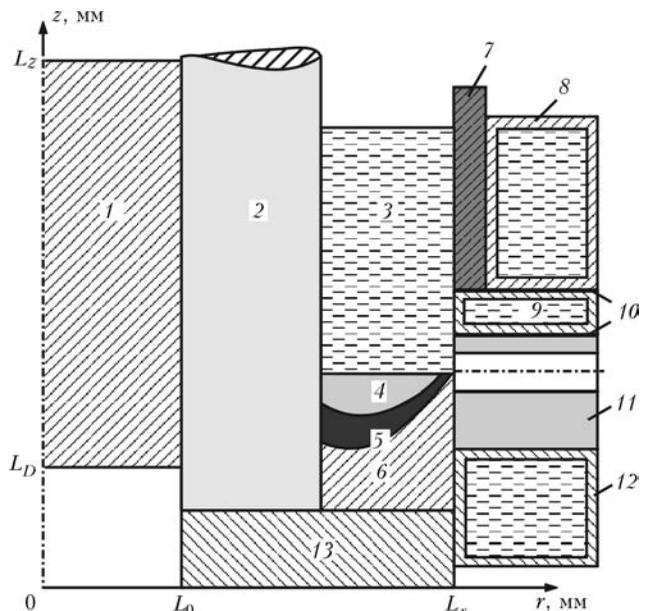


Рис. 3. Схема расчетной области при моделировании процесса изготовления полых слитков способом ЭШН ЖМ: 1 – водоохлаждаемый дорн; 2 – центральная заготовка (стенка трубы); 3 – ванна жидкого шлака; 4 – ванна жидкого металла; 5 – двухфазная зона; 6 – наплавленный слой; 7 – графитовая футеровка; 8, 9, 12 – токоподводящие водоохлаждаемые секции кристаллизатора; 10 – изолятор; 11 – канал датчика уровня металлической ванны; 13 – затравка

* От редакции.
Эта статья была подготовлена академиком В.И. Махненко незадолго до смерти. Соавторы и редколлегия просят читателей обратить внимание на появившуюся частную информацию от Ю.И. Уточкина (ОАО «Объединенные машиностроительные заводы», Россия) о пуске в эксплуатацию в Италии кольцевом стане, способного раскатывать кольца массой до 200 т.

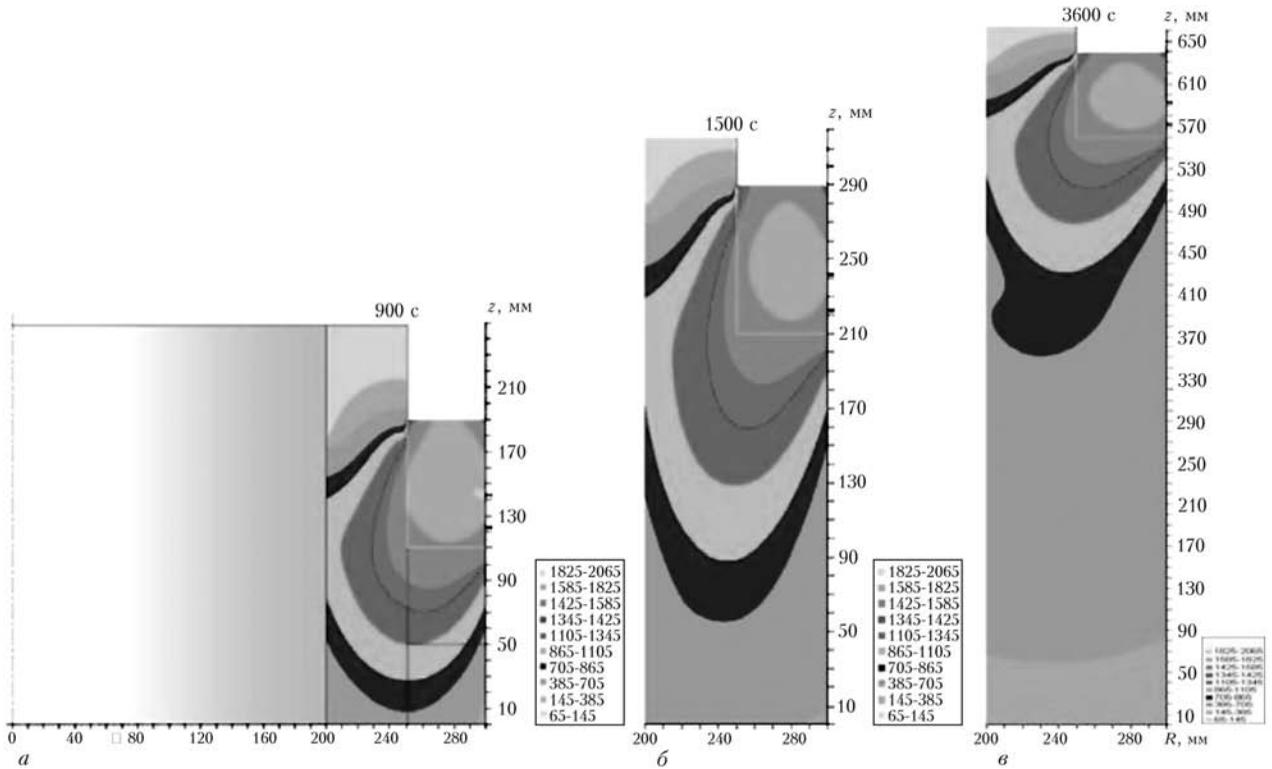


Рис. 4. Распределение температуры в слитке: а – через 900 с от начала процесса; б – через 1500 с; в – через 3600 с

При формировании наплавленного слоя в процессе получения крупного полого слитка технологический режим ЭШН ЖМ выбирают таким образом, чтобы обеспечить минимальное и равномерное проплавление по сечению и высоте центрального слитка или трубы.

В связи с тем, что выплавка крупных полых слитков экспериментальным путем на стадии разработки нового способа ЭШН ЖМ в лабораторных условиях невозможна из-за отсутствия соответствующего оборудования, а также требует больших затрат, особенно с учетом стоимости материала и электрической энергии, применили методы математического и физического моделирования.

Ниже показаны результаты математического моделирования согласно схеме, приведенной на рис. 3, и распределения значений температуры (рис. 4) в процессе ЭШН ЖМ при наплавлении на трубу из стали X18H9T диаметром 500 мм с толщиной стенки 50 мм металлом того же химического состава слоя толщиной 50 мм и высотой 700 мм.

Математическая модель процесса состоит из нескольких задач, формулировка которых соответствует характерным физическим явлениям, связанным друг с другом:

определение поля электрического потенциала в жидкой шлаковой ванне и соответствующего тепловыделения;

расчет температурного поля в шлаковой и металлической ваннах с учетом порционного поступления жидкого присадочного металла;

определение параметров двухфазной зоны, на основе которых по Балантайну можно судить о степени неблагоприятного проявления ликвационных процессов в слитке.

Подробное описание расчетных схем, основанных на теории теплопроводности. Задача распределения тепловой мощности в шлаковой ванне не отличается от подобной задачи для случая получения сплошного слитка способом ЭШН ЖМ. Вместе с тем для определения температурного поля $T(r, z, t)$ в полой слитке область решения $0 < z < LZ$; $L_0 < r < LR$ не является симметричной. Кроме того, внутри трубы располагается водоохлаждаемый дорн, который дополнительно отводит тепло.

Поэтому температура $T(r, z, t)$, определяется в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W = rc\gamma \frac{\partial T}{\partial t},$$

где тепловыделение

$$W(r, z, t) = \frac{r}{\rho(T)} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 \right]$$

при условиях $t = 0 \quad T = T(r, z)$;

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_B(T - T_B) \text{ для } r = L_0, L_D < z < L_Z;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1(T - T_{cp}) \text{ для } r = L_0, 0 < z < L_D;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1(T - T_{cp}) \text{ для } z = 0, z = L_Z,$$

здесь α_1 – коэффициент теплообмена между стенкой трубы и воздухом с температурой T_{cp} ; α_B –

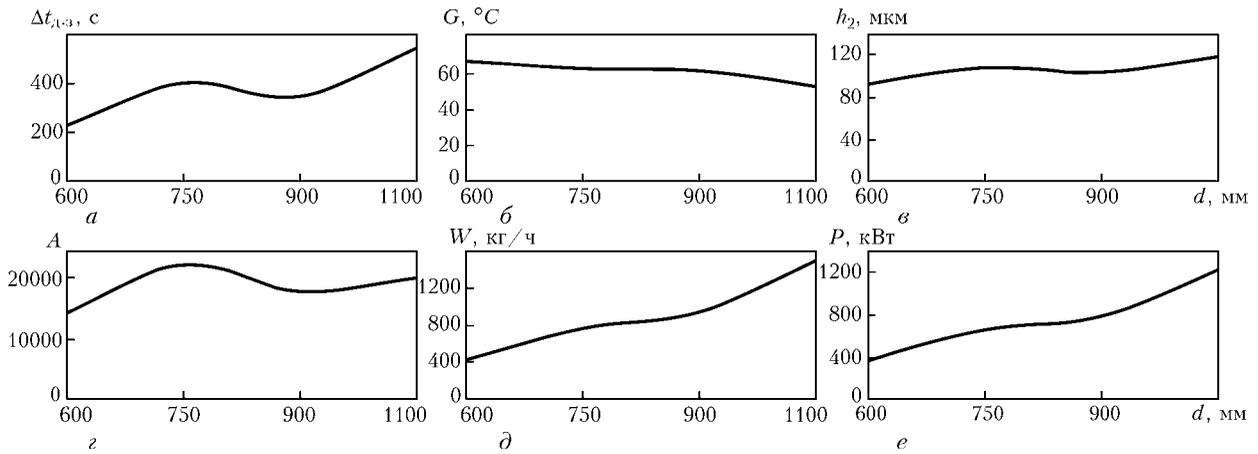


Рис. 5. Качественные и энергетические параметры процесса ЭШН ЖМ при увеличении диаметра полых слитков в процессе ЭШН ЖМ: *a* – время пребывания металла в двухфазной зоне; *b* – градиент температур; *c* – расстояние между вторичными осями дендритов; *z* – параметр Балантайна *A*; *d* – производительность процесса ЭШН ЖМ; *e* – мощность *P* процесса ЭШН ЖМ; *d* – диаметр слитка

коэффициент теплообмена между стенкой трубы и дорном с температурой T_B . Как и для случая сплошного слитка, решение электрической и тепловой задач определяется численным способом.

Параметром, характеризующим качество металла наплавленного полого слитка, является градиент температуры в двухфазной зоне:

$$G = \frac{\partial T}{\partial n} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}.$$

Расстояния между осями дендритов второго порядка по Балантайну и Митчеллу определяются формулой:

$$h_2 \approx 20,2\Delta t_{д,з} = 0,28,$$

где $\Delta t_{д,з} = [T_L - T_S]$ – время пребывания металла в двухфазной зоне.

Влияние водоохлаждаемого дорна в схеме процесса сказывается на глубине проплавления стенки трубы; при расчетах этого варианта без дорна проплавление было бы значительно больше.

Характерный параметр *A*, малое значение которого характеризует равноосный тип кристаллизации, а большое свидетельствует о наличии дендритной столбчатой структуры, выражается формулой

$$A = \frac{G}{V} = \frac{G^2 \Delta t_{д,з}}{T_L - T_S}.$$

Выполнена оценка энергетических и качественных характеристик процесса получения полого слитка диаметром до 1100 мм (рис. 5).

Изучали зону сплавления, присущую как сплошным, так и полым слиткам независимо от диаметра слитка. Металлографические исследования зоны сплавления модельного двухслойного слитка диаметром 110/180 мм из высоколегированной стали типа AISI 316 свидетельствуют о наличии однородной плотной структуры, высокой химической однородности, отсутствии дефектов усадочного и

ликвационного характера. Литой металл ЭШП отличается высоким стабильным уровнем и изотропностью физико-механических свойств в диапазоне требований, предъявляемых к деформированному металлу традиционных способов выплавки [11].

Выводы

Применение способов математического и физического моделирования, а также результатов металлографических исследований зоны сплавления слоев одного химического состава модельного двухслойного слитка диаметром 110/180 мм из высоколегированной стали AISI типа 316 позволило оценить эффективность процесса ЭШН ЖМ при получении крупных полых слитков диаметром до 1100 мм способом ЭШН ЖМ.

1. *Механіка матеріалів і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій* / О.І. Балицький, О.В. Махненко, О.О. Балицький та ін. – Київ: Академперіодика, 2005. – 544 с.
2. *Манько П.А., Соловйский Б.Е.* Производство судовых реакторов и парогенераторов. – М.: Судостроение, 1969. – 220 с.
3. *Стольный В.И., Бережко Б.И., Бушуев С.В.* Технологические особенности изготовления крупногабаритных полуфабрикатов из жаропрочных сплавов для высокотемпературных ядерных газовых реакторов // Прогрессивные материалы и технологии. – 1999. – № 3. – С. 88–91.
4. *Перспективы производства сварных толстостенных биметаллических корпусов сосудов высокого давления* / Б.Е. Патон, А.Д. Чепурной, В.Я. Саенко, Л.Б. Медовар // Автомат. сварка. – 2004. – № 1. – С. 30–39.
5. *Концептуальная оценка технических и экономических преимуществ производства крупногабаритных поковок из полого слитка* / Б.И. Бережко, В.Н. Орлова, О.Н. Романов, А.А. Хохлов // Вопросы материаловедения. – 2000. – № 1. – С. 17–22.
6. *Колчион Э.Ю., Уточкин Ю.И.* Производство крупных изделий ответственного назначения для энергомашиностроения // Электрометаллургия. – 2004. – № 5. – С. 43–46.
7. *Митчелл А.* Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электрометаллургия. – 2005. – № 2. – С.3–8.
8. *Исследование качества крупногабаритной обечайки из 360-тонного слитка стали 15X2НМФА для атомного реактора* / В.А.Дурынин, Т.И. Титова, Г.П. Матвеев, С.Ю. Баландин // Электрометаллургия. – 2003. – № 8. – С. 45–48.



9. *Новый* технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С.3–7.
10. Пат. 94333 Україна МПК В22D 19/16; С22В 9/18; В23К 25/00; С23С 6/00. Спосіб виготовлення великотоннажного металевого зливка / Л.Б. Медовар, Г.П. Стівченко, В.Я. Саенко та ін. — Опубл. 26.04.2011; Бюл. № 8.
11. *Полишко Г.О.* Особливості укрупнення зливоків послідовним кільцевим електрошлаковим наплавленням: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2011. — 19 с.

Manufacture of thick-walled bodies of reactors for nuclear power engineering and oil-refining industry is based on the methods of forging, expansion, stamping and characterized by a long working cycle, significant labor consumption, large consumption of body alloyed metal and welding consumables, a unique forge-pressing, rolling, stamping and welding equipment is required for its realization. To manufacture bodies, both forge-welded and also stamp-welded ones, the ingots of 100...200 t mass and more are required. The new opportunities for producing hollow high-quality billets for reactor bodies are open due to technological process, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, for producing large ingots by the method of a circumferential electroslag surfacing with liquid metal (ESS LM) of one or more layers on central ingot, which can be both of solid section and hollow. In formation of the deposited layer of the large hollow ingot, the technological condition of ESS LM is selected so that to provide the minimum and uniform melting of the central hollow billet (pipe). Results of modeling of process of manufacture of large hollow ingots of high-alloy steel AISI of 316 type using the method of circumferential ESS LM are presented. Mathematical modeling showed that it is possible to produce not only solid, but also hollow ingots by the circumferential surfacing of metal layers. The number of layers being deposited depends on sizes and mass of the ingots. Metallographic examinations on model ingots confirmed the high structural and chemical homogeneity of the metal fusion zone. Here, the ESS LM allows producing hollow ingots both of similar chemical composition and also heterogeneous ones, Ref. 11, Figs. 5.

Key words: *ESS LM; power machine building; petrochemical machine building; reactor body; mathematical modeling; hollow ingot; high-alloy steel; model ingot; fusion zone*

Поступила 24.12.2012

УКРАИНСКИЕ КРИСТАЛЛЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В ПЕРЕДОВЫХ ВОЕННЫХ РАЗРАБОТКАХ ВЕДУЩИХ ОБОРОННЫХ КОМПАНИЙ

Уже давно не секрет, что ученые Государственного научного учреждения «Научно-технологический комплекс «Институт монокристаллов» (Харьков) разработали технологию производства прозрачной тонкой брони, способной выдержать попадание бронебойной пули из снайперской винтовки.

Технология «прозрачной брони» заключается в использовании принципа «трехслойный бутерброд» из стекла, пластмассы и сапфира. Задача сапфира — превратить конусную пулю в цилиндрическую. А задача следующих слоев — задержать ее в пределах своей толщины.

Сапфиры, которые используют в Институте монокристаллов для прозрачной брони, — искусственные, однако по твердости уступают только алмазу. При ударе о слой сапфира пуля сплющивается, а значит, удар уже ослаблен, и его сможет выдержать даже не толстое стекло.

Производство «прозрачной брони» из сапфира было освоено институтом в рамках гранта НАТО. Испытания, которые провели военные НАТО, показали, что броня выдерживает попадание бронебойной пули.

Помимо этого, украинские кристаллы используются в оптических приборах, лазерных установках и микроэлектронике. В рамках выполнения программы «Разработка и освоение микроэлектронных технологий, организация серийного выпуска приборов и систем на их основе» в 2012 году разработаны технологии выращивания объемного сапфира весом до 60 кг методом Киропулоса, выращивания сапфировых пластин методом Степанова шириной 120 мм и технология получения высококачественных подложек для структур «кремний на сапфире», светодиодов и других комплектующих приборов микроэлектроники.

Определены и отработаны тепловые условия выращивания методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) кристаллов сапфира высокого оптического качества и структурного совершенства с рекордной для ГНК толщиной пластин — 80 мм. При общем размере кристалла 350x170x80 мм³ эта разработка более, чем в 2 раза, повышает экономическую эффективность традиционного метода ГНК, обеспечивает по сравнению с методом Киропулоса его конкурентоспособность и дает возможность выхода Украины на мировой рынок 6-10 дюймовых подложек из сапфира для современной микро- и оптоэлектроники.

<http://vpk.name>