



УДК 669.117.56

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ

А. И. Балицкий, Л. Б. Медовар

Рассмотрены некоторые проблемы технологии производства современных сталей и сплавов для энергетики. Приведены данные о современных сталях и сплавах для применения в тепловых турбинах с рабочими температурами 650... 700 °С. Проанализирована технология производства бандажных колец из высокоазотистых сталей. Показана роль электрошлакового переплава. Изложены перспективные направления работ по совершенствованию материалов и технологий энергетического машиностроения.

Some problems of technology of production of modern steels and alloys for power engineering are considered. Data are given about modern steels and alloys for application in heat turbines with 650... 700 °C operating temperatures. Technology of manufacture of band rings of high-nitrogen steels was analyzed. The role of electroslag remelting is shown. The challenging directions of works on improvement of materials and technologies of power machine building are described.

Ключевые слова: паровые и газовые турбины; роторы; диски; бандажные кольца; электрошлаковый переплав; высокоазотистая сталь; суперсплавы

Энергетическая безопасность страны зависит от многих факторов, в частности от состояния энергогенерирующих станций. Несмотря на опережающие темпы развития атомной энергетики значительная часть электроэнергии в Украине все еще производится и будет производиться на тепловых станциях.

Между тем состояние оборудования на этих станциях оставляет желать лучшего. Срок эксплуатации некоторых элементов конструкций, работающих в газообразном водороде (сосуды под давлением, корпуса электролизеров, осушителей водорода, водородные магистрали, охлаждаемые водородом роторы и бандажные кольца) уже превысил 50 лет [1, 2].

Старение и значительный износ энергетических установок требует их замены и модернизации. В то же время, несмотря на наличие заводов, которые могут производить современное энергетическое оборудование («Турбоатом» в Харькове, «Заря» в Николаеве), Украина не имеет оборудования и технологий изготовления соответствующих современных конструкционных металлических материалов [3–8]. Наши предприятия могут выпускать лишь энергоблоки морально устаревших конструкций или закупать современные материалы за рубежом (как например, для энергетических газовых турбин). И в том и в другом случае это не соответствует условиям энергетической безопасности страны.

Сложившаяся ситуация обусловлена тем, что повышение эффективности (и экологичности энергосистем) непосредственно связано с технологическими параметрами энергоблоков. Чем выше значения рабочих температур и давления в энергетической турбине, тем (при прочих равных условиях) выше КПД турбины и меньше выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Отставание отечественной энергетики в этом аспекте хорошо известно. Например, для современных паровых турбин уровень рабочих температур составляет 650 °С, а отечественная энергетика работает при 540... 550 °С, как и сорок лет назад. Более того, сегодня в мире интенсивно работают над повышением рабочей температуры свыше 700 °С.

Однако увеличение параметров рабочих температур и давления невозможно без использования новых материалов, для создания которых требуется решить ряд материаловедческих, технологических и организационно-технических проблем, причем с использованием материалов различного класса. В данной работе сделана попытка проанализировать указанные проблемы и наметить пути их решения. Существуют два основных типа турбин: паровые и газовые. Они отличаются по конструктивным особенностям и технологическим параметрам.

Газовые турбины работают при значительно более высоких температурах и поэтому для их изготовления используют сложнелегированные и более дорогие сплавы. В настоящее время температура газов нового класса газовых энергетических

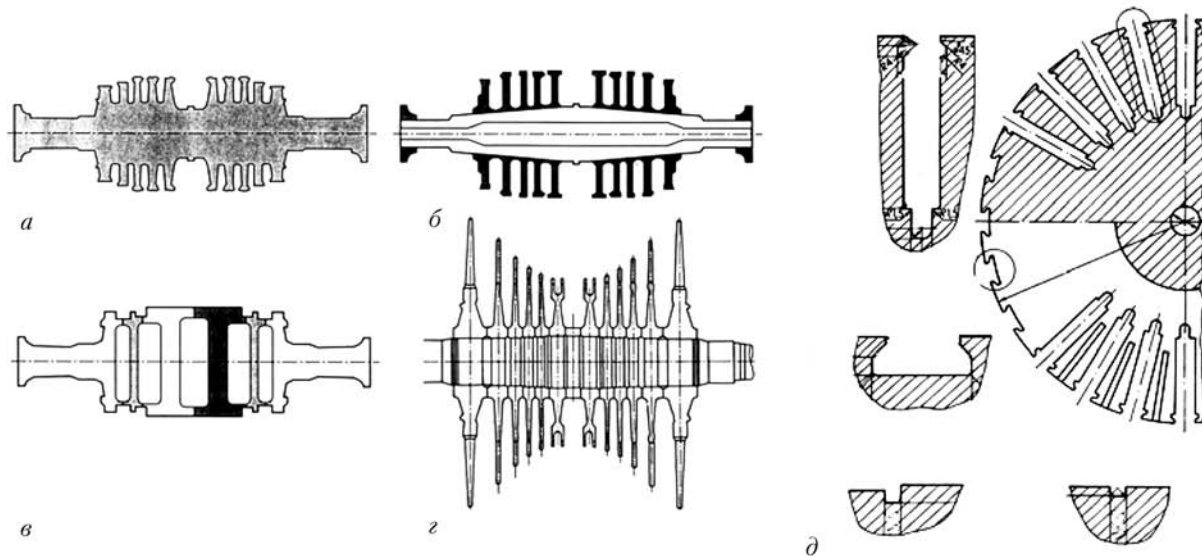


Рис. 1. Типы дисков роторов турбин: *a* — цельнокованый; *б, з* — сборный (с насадными дисками); *в* — сварной (из отдельных дисков — конструкция фирмы ABB Power Generation, Швейцария) [1, 10]; *д* — бочка ротора турбогенератора с детализацией пазов для клиньев [2]

турбин, называемых F и H классом, достигает соответственно 1260 и 1427 °С, тогда как рабочая температура современных паровых турбин, как правило, не превышает 650 °С. Поэтому для изготовления роторов газовых турбин используют супер-сплавы на никелевой основе, а для роторов паровых или парогазовых турбин — легированные и высоколегированные стали. (С переходом на рабочие температуры 700 °С и выше планируется использование суперсплавов и для паровых турбин [5]).

Еще одна проблема заключается в отсутствии отечественного производства охлаждаемых водородом роторов и бандажей турбогенераторов широкой гаммы мощностей, хотя в 1980–1990-е гг. опыт соответствующей кооперации уже был [9, 10]. В результате имеем старение вращающихся конструкций турбоагрегатов, частые водородные повреждения, ввоз в Украину устаревших, подержанных конструкций.

Развитие энергомашиностроения требует постоянного совершенствования металлических материалов. Для повышения рабочих параметров энергоблоков следует усложнять металлические материалы. Во то же время металлургическое качество заготовок необходимого размера можно обеспечить с помощью применения технологии выплавки и контроля затвердевания (кристаллизации) этих материалов при изготовлении крупных кузнечных слитков.

При получении заготовок из высокочистых материалов с однородной структурой для современного энергомашиностроения требуется использование самых передовых технологий, таких как плавка металлов в вакууме, вакуум-углеродное раскисление, вакуумно-дуговой и электрошлаковый переплавы. Электрошлаковый переплав может быть использован не только для повышения качества кузнечных слитков, но и для изготовления композитных роторов, поскольку наряду с цельноковаными моно-

блочными роторами все более широкое распространение получают композитные роторы, особенно для паровых турбин (рис. 1).

Такие роторы можно изготавливать из различных сталей, в большей степени соответствующих конкретным условиям эксплуатации каждой секции ротора. Зачастую их выполняют с помощью сварки. Однако сварка разнородных сталей в таких сечениях сопряжена с большими сложностями. Электрошлаковая технология позволяет устранить эту проблему и получить композитные роторы с усовершенствованной (композитной) структурой.

Научное материаловедение и развитие технологических процессов на академическом уровне соответствуют зарубежным достижениям в этой области, а иногда и их превосходят, в отличие от промышленного. После 1990-х гг. в области практического материаловедения для энергетики в Украине особых достижений не отмечено.

В период 1950–1980-х гг. паровые турбины для тепловых станций, работающих на угле, строились в основном на температуру пара до 550 °С. При этом наиболее распространенной для изготовления секции высокого и среднего давления роторов была сталь Cr–Mo–V с содержанием 1 % хрома (типа 25ХНЗМФА). Развитие техники при производстве энергоблоков для паровых турбин так и осталось в Украине на этом же уровне до сих пор.

Отмечено, что параметры паровых энергоблоков в промышленно развитых странах существенно повысились. Соответственно разрабатывались и осваивались промышленностью новые материалы. Были реализованы усилия объединенной Европы по оптимизации состава стали и совершенствованию технологии их выплавки для перехода на значения температуры 550... 600 °С и выше.

В Западной Европе эти работы проводились в рамках общеевропейских специальных проектов



COST (cooperation in science & technology, т. е. кооперация в науке и технологии). Так, основной целью проекта COST 501 являлось создание сталей, обеспечивающих эксплуатацию роторов паровых турбин при температуре до 600 °С.

В рамках этого проекта осуществлена разработка 9... 12%-х хромовых сталей для крупных отливок и поковок. Создано несколько марок таких сталей с различными механизмами упрочнения, из которых только в Европе в 1990-х гг. изготовлено 22 ротора паровых турбин для работы при температуре 600... 625 °С и давлении до 30 МПа с максимальным диаметром 1280 мм и массой до 45 т. Они используются на 14 тепловых станциях мощностью до 950 МВт.

Указанные работы проводились и далее в рамках проекта COST 522 [11] с целью создания высокохромистых мартенситных сталей для эксплуатации при температурах 630... 650 °С. За основу приняли стали класса E с комплексным легированием азотом, бором, кобальтом, ванадием.

В рамках COST 505 создан композиционный ротор EPRI-Еуроге с диаметрами секций высокого (1250 мм) и низкого давления (1750 мм). Только за шесть лет (с 1988 по 1994 гг.) изготовлено 25 таких роторов. В последующие годы продолжалось совершенствование технологий производства европейского ротора, и к 2000 г. фирмой «Saarschmiede» изготовлено уже 89 моноблочных заготовок роторов общей массой 2960 т.

В качестве материалов для эксплуатации при температурах выше 600... 650 °С применяют аустенитные стали и сплавы на никелевой основе с интерметаллидным упрочнением. Типичными представителями этих материалов являются сталь A-286, а также суперсплавы Инконель 706 и Инконель 718, используемые в основном для изготовления дисков авиационных и энергетических газовых турбин.

Общими при производстве поковок для роторов турбин из этих материалов являются проблемы, связанные с обеспечением стабильности состава и однородности структуры металла.

Максимальный диаметр бездефектного слитка из данных сплавов при современном промышленном уровне металлургической техники обычно составляет не более 500... 600 мм. В Украине почти нет опыта производства таких суперсплавов и, согласно экспертной оценке, уровень металлургической техники не позволяет выплавлять слитки из этих материалов диаметром более 400 мм.

В то же время в последние годы в НАН Украины разработаны новейшие технологии электрошлакового переплава указанных суперсплавов, позволяющие преодолеть эти ограничения. Вместе с тем без выполнения соответствующих инновационных проектов в области материаловедения производства в Украине современного энергетического оборудования невозможно.

Обычному эволюционному развитию техники в этом вопросе мешает парадоксальная ситуация, сложившаяся в Украине, при которой и разработчики,

и производители, и поставщики материалов для энергетики заинтересованы в их производстве, но ничего не могут изменить. Машиностроители часто отказываются от заказов на производство современных энергоблоков, если отсутствуют соответствующие материалы, а металлурги не готовы делать капиталовложения, не имея заказов на такие материалы. В результате несмотря на современный научный потенциал и соответствующие наработки в области материалов и технологий для энергетики мы остановились в развитии этой отрасли.

Выходом из сложившейся ситуации могло бы стать создание комплексной общеукраинской (по примеру общеевропейских) энергетической программы, предусматривающей в том числе создание и освоение промышленностью современных материалов для энергетики с привлечением научных организаций (например, ИПМ, ИМФ, ИЭС, ФМИ НАНУ) и промышленных предприятий (таких, как «Энергомашспецсталь», «Днепроспецсталь», НКМЗ, «Турбоатом», «Заря-Машпроект»).

Некоторые более подробные технические аспекты указанной программы обозначены далее. Для этого рассмотрим отдельные этапы технологии изготовления таких ответственных элементов современных энергоагрегатов, как роторы и бандажные кольца.

Относительно роторов паровых и газовых турбин много сказано было на последней всемирной встрече кузнецов в 2008 г. [12]. Заметим, что в Украине сегодня есть возможности изготовления, т. е. отливки слитков иковки заготовок роторов сталей с повышенным содержанием хрома. Это прежде всего краматорские заводы НКМЗ и Энергомашспецсталь. Но для перехода на 12%-е хромовые стали нужна печь ЭШП мощностью не менее 100 т. Отметим также, что на протяжении 2010–2011 гг. в мире будет введено в эксплуатацию не менее восьми печей ЭШП для выплавки слитков массой от 100 до 450 т [13].

Критическим элементом энергоагрегата является бандажное кольцо. Технология изготовления бандажей (рис. 2) из высокоазотистых немагнитных сталей [14, 15–18], опыт производства которых имеется на отечественных металлургических предприятиях [9, 10], предусматривает, в частности, электрошлаковый переплав.

Послековки кольцо проходит термообработку при $T = 1030... 1070$ °С и закаляется в воде. Поскольку аустенитные стали после горячей обработки давлением или аустенизирующей термообработки характеризуются относительно низкой прочностью, заготовки бандажных колец в холодном состоянии растягивают (деформационно упрочняют).

Большинство колец растягивают гидравлически или механически, а также и взрывом. Эта операция должна обеспечить высокую прочность и нужные размеры, но не снизить уровни пластичности и вязкости ниже допустимых и безопасных.



Гидравлическое растяжение гарантирует относительную однородность механических свойств по периметру кольца, а упрочнение у внутренней поверхности и остаточные напряжения сжатия, возникающие здесь, способствуют увеличению несущей способности кольца.

Дополнительным преимуществом этого способа является совпадение направления действия основных по уровню рабочих напряжений в бандажном кольце с направлением растяжения. На конечной стадии производства кольца проходят стабилизирующую термическую обработку при 350 °С [19–26].

Электрошлаковому переплаву высокоазотистых сталей и разработке уникального оборудования для ЭШП посвящены многочисленные работы [7–10]. Высокопрочные стали с содержанием около 1 % азота выплавляют как в обычных условиях (азот вводят с марганцевой и хромовой лигатурой), так и в печах с повышенным давлением азота.

Стали, изготавливаемые с использованием специальных способов литья с «противодавлением» азота при высоком (до 1,4 %) содержании азота и без последующей холодной пластической обработки, имеют уникальные для закаленных аустенитных материалов прочностные свойства (σ_T может достигать 1000 МПа) [2]. Однако такие технологии теперь редко применяют, а традиционно содержание азота ограничивают 0,5 %. Наряду с ЭШП в защитной атмосфере может быть применен и дугошлаковый переплав (ДШП) [6, 7].

Промышленная проверка ДШП показала, что этим способом можно получать слитки разного сечения, с хорошей внешней поверхностью и почти в 1,5 раза меньшими удельными затратами электроэнергии. Наличие мощной электрической дуги в зоне плавления металла при ДШП в атмосфере азота создает благоприятные условия для легирования стали азотом. При ДШП в азоте повышенного давления появляется принципиальная возможность легировать сталь азотом непосредственно из газовой фазы вплоть до сверхравновесных его концентраций. Однако пока основным процессом изготовления металла бандажных колец остается стандартный ЭШП при атмосферном давлении, что обеспечивает производство сталей типа X18–Г18 (18Mn–18Cr) с почти равновесным содержанием азота.

Многочисленные эксперименты, в том числе в промышленных условиях, позволили создать технологию производства заготовок немагнитных бандажных колец для турбогенераторов из высокоазотистой стали 12X18AG18Ш, что обеспечивает изготовление бандажных заготовок, в том числе и для турбогенераторов мощностью от 800 до 1200... 1500 МВт [8–10].

По уровню коррозионно-механических свойств сталь 12X18AG18Ш, которая изготавливалась в Украине способом электрошлакового переплава, является паритетной японским 18Mn–18Cr и немецким P900 аналогам с рекордными значениями произведения прочности σ_T на вязкость разрушения K_{IC} $4,4 \cdot 10^5$ МПа $^{2/3}$ м [1].

Подробные данные об исследовании различных аспектов данной проблемы изложены в работах [15–17, 27–32]. Отметим также, что в Украине производить коррозионностойкие бандажные кольца необходимой группы прочности для ТЭС и АЭС можно на базе двух заводов – «Днепроспецсталь» и Новокраматорского машиностроительного.

С помощью этого обзора авторы пытаются привлечь внимание к проблеме, вынесенной в заголовок. Вполне очевидно, что без современных материалов

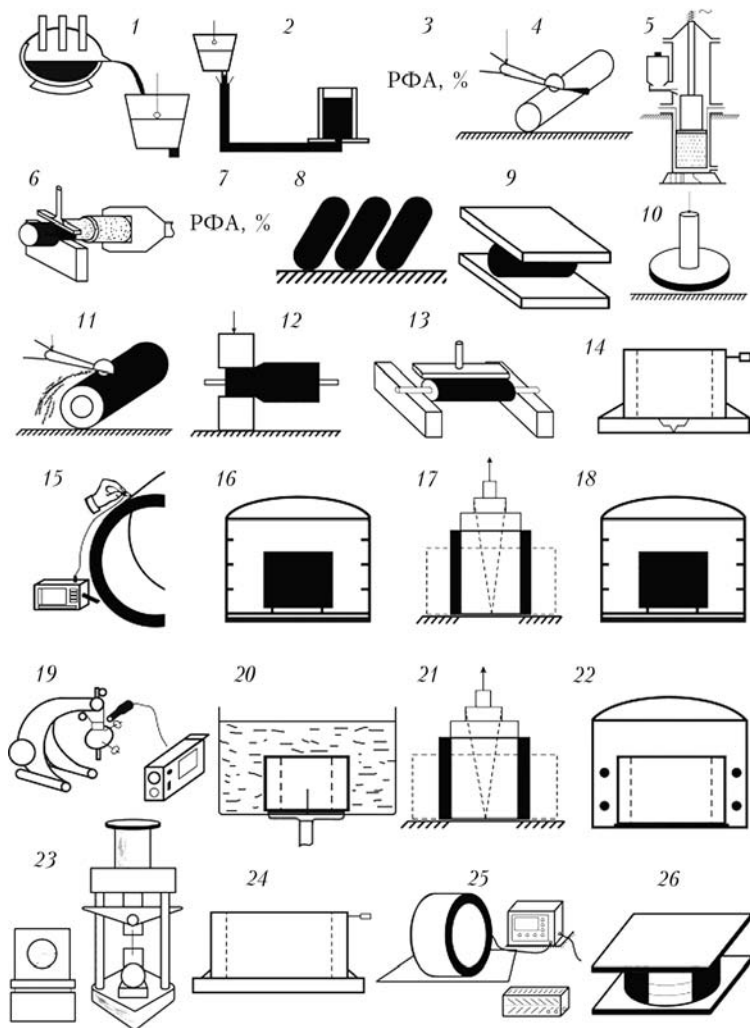


Рис. 2. Технологическая схема приготовления бандажного кольца, включающая следующие операции: 1 – выплавку; 2 – разливку металла; 3 – рентгенофлуоресцентный анализ (РФА); 4 – обтачивание; 5 – электрошлаковый переплав под давлением; 6 – первичную ковку; 7 – РФА; 8 – резку; 9 – высадку; 10 – сверление; 11 – обдирку; 12 – медленную ковку; 13 – раскатку; 14 – грубую обработку; 15 – ультразвуковую дефектоскопию; 16 – термообработку на твердый раствор (ТТР); 17 – закалку; 18 – холодную растяжку (ХР); 19 – ТТР; 20 – контроль структуры; 21 – ХР; 22 – снятие остаточных напряжений; 23 – устройство исследования механических характеристик; 24 – финишную доводку; 25 – неразрушающий контроль; 26 – упаковку



нет современного энергетического машиностроения. А без такового судить об энергетической безопасности страны сложно.

1. *Балицкий О. И.* Сучасні матеріали для потужних турбогенераторів. — Львів: Простір-М, 1999. — 284 с.
2. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довід. посібник* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький та ін. — Київ: ВД «Академперіодика», 2005. — 534 с.
3. *Перспективи* применения электрошлаковых технологий в производстве сосудов высокого давления / Б. Е. Патон, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 1. — С. 3–9.
4. *Arc-clag remelting of steel and alloys* / В. I. Medovar, V. Ja. Saenko, G. M. Grigorenko et al. — Cambridge: Cambridge Int. Sci., 1996. — 160 p.
5. *Large 718 forgings for land based turbines* / R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson et al // Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives: Proc. Intern. Symp. on Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives. TMS (USA, Florida, June 15–18, 1997). — Florida, 1997. — P. 141–152.
6. *Митчелл А.* Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 2. — С. 3–8.
7. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я.* О некоторых «старых-новых» задачах ЭШП // Там же. — 2004. — № 3. — С. 7–10.
8. *Новий технологический процесс* получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ ЭШП / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 2007. — № 3. — С. 3–7.
9. *Особенности* электрошлакового переплава и свойства высокопрочной бандажной стали / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, А. С. Волков и др. // Проблемы коррозии и противокоррозийного захисту матеріалів: Матеріали 4-ї міжнарод. конф.-виставки «Корозія-98» (Львів, 9–11 червня 1998 р.). — Львів, 1998. — С. 151–154.
10. *Технология* производства заготовок немагнитных бандажных колец для турбогенераторов из коррозионностойкой высокоазотистой стали / В. В. Войнов, Ю. Н. Гойхенберг, Л. Г. Журавлев и др. // Высокоазотистые стали: Тр. I всесоюз. конф. (Київ, 18–20 апр. 1990). — Киев, 1990. — С. 411–412.
11. *Vanstone R. W.* Alloy design and microstructural control for improved 9...12% Cr power plant steels, Annex A, COST 522, Steam Power Plant, Final Report, 1998–2003. — P. 41–47.
12. *Gianfrancesco A. Di.* High Temperature Properties and Creep Behaviour of a CrMoCoV (FB2) Steel Trial Rotor // Proc. of the 17 th Intern. Forgemasters Meeting (Santander, Spain, Nov. 3–7, 2008). — Santander, 2008. — P. 36–40.
13. *New Plant Concept for the Production of Large Sized Ingots* / H. Holzgruber, B. Ofner, M. Ramprecht et al. // Proc. of the LMPC. — 2009. — P. 273–281.
14. *Технология* ЭШП высокоазотистой стали 12X18AГ18 в слитки массой 18 т / Г. Г. Куткин, Л. М. Васильев, И. М. Зувев и др. // Тез. докл. I всесоюз. конф. по высокоазотистым сталям (Київ, 18–20 апр. 1990). — Киев, 1990. — С. 8.
15. *Pat. 4493733 USA, Int.Cl. 3 C22C38/58.* Corrosion-Resistant Non-Magnetic Steel Retaining Ring for a generator / M. Yamamoto, T. Yebisuya T., M. Kamai, K. Tajima. — Publ. 15.01.85.
16. *А. с. 1488352 СССР, МКІ⁴ С22С 38/38.* Коррозионно-стойкая немагнитная сталь / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, В. Г. Макаренко, И. А. Пovyшев. — Опубл. 23.06.89; Бюл. № 23.
17. *А. с. 1668466 СССР, МКІ⁴ С 22 С 38/60.* Водородо-стойкая сталь / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, И. А. Пovyшев, В. Н. Павлов, В. Г. Макаренко, В. В. Лебедев. — Опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.
18. *А. с. 1488356 СССР, МКІ⁴ С 22 С 38/38.* Немагнитная сталь / А. И. Балицкий, В. И. Похмурский, И. А. Пovyшев, В. Г. Макаренко. — Опубл. 23.06.89; Бюл. № 23.
19. *Марочник* сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. // Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
20. *Stein G., Menzel J., Kirschner W.* Manufacturing and operation of retaining rings made out of stress corrosion resistant steels // MaTeh' 1996: Proc. 1st Intern. conf. «Development, Testing and Application of Materials» (Opatija, Croatia, 2–5 Oct., 1996). — Opatija, 1996. — P. 203–208.
21. *Stein G., Menzel I., Chowdhury A.* Industrial manufacture of massive nitrogen-alloyed steels in a pressure ESR furnace // Steel times. — 1989. — 217, № 3. — P. 1461–150.
22. *Stein G., Feichtinger H.* Industrial usage of high nitrogen steels // Nitrogen Steels: Proc. conf. (Gliwice-Wisla, Poland, 24–26 Apr., 1996). — Gliwice-Wisla, 1996. — P. 5–16.
23. *Menzel J., Kirschner W., Stein G.* High nitrogen containing Ni-free austenitic steels for medical applications // Ibid. — P. 139–148.
24. *Lueg J., Kirschner W., Stein G.* CRONIDUR-alloys: Microstructure, properties and applications of HNS-martensitic steels // Ibid. — P. 189–196.
25. *Production of non-magnetic rings from 18Cr–18Mn–0,5N2 steel under state steel industry conditions* / В. Hodyny, J. Wiedermann, J. Bik, W. Pilecki // Ibid. — P. 197–204.
26. *VSG Energie- und Schmiedetechnik GmbH* developed a new generation of steels. — Essen: VSG Energie- und Schmiedetechnik GmbH, 1998. — 12 p.
27. *Retaining Rings: Product Literature* / Krupp Metal und Schmiedewerke. — Essen, 1990. — 54 p.
28. *Балицкий А. И., Костюк И. Ф., Крохмальний О. А.* Физико-механическая неоднородность сварных соединений высокоазотистых хромомарганцевых сталей и их коррозионная стойкость // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 28–31.
29. *Балицкий А. И.* 7-я международная конференция по высокоазотистым сталям HNS-2003 // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 1. — С. 55.
30. *Balitskii A. I.* Today and future welding // Physicochemical mechanics of materials. — 2003. — 39, № 6. — P. 118–120.
31. *Балицкий А. И.* Международная конференция по высокоазотистым сталям HNS-2004 // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 4. — С. 56.
32. *Balitskii A. I.* Corrosion resistance of high nitrogen Cr–Mn steels and welding joining // Steel Grips. — 2004. — № 2. — P. 585–589.

Физико-механический ин-т

им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов

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

Поступила 15.11.2010