



УДК 669.245.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-5-5

**ВАКУУМНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ
ПЛАВИЛЬНО-РАЗЛИВОЧНАЯ УСТАНОВКА
VIM 12 Ш НМС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Д.Е. Каблов

кандидат технических наук

Е.Г. Шомполов

В.В. Сидоров

доктор технических наук

А.В. Горюнов

Май 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Д.Е. Каблов¹, Е.Г. Шомполов¹, В.В. Сидоров¹, А.В. Горюнов¹

ВАКУУМНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВИЛЬНО-РАЗЛИВОЧНАЯ УСТАНОВКА VIM 12 III НМС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрена конструкция вакуумных индукционных установок, в том числе современной вакуумной индукционной печи VIM 12 III НМС производства фирмы ALD (Германия). Установка VIM 12 III НМС имеет все необходимые узлы и устройства, в том числе датчики для замера окисленности расплава, и отвечает самым современным требованиям к вакуумному оборудованию. Установка позволит разработать новые эффективные технологические процессы выплавки литейных жаропрочных никелевых сплавов последнего поколения для монокристаллического литья и, тем самым, повысить их эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, вакуумная индукционная печь, высокое качество, вакуум.

D.E. Kablov¹, E.G. Shompolov¹, V.V. Sidorov¹, A.V. Gorunov¹

THE VACUUM INDUCTION MELTING-POURING INSTALLATION VIM 12 III HMC FOR HIGH QUALITY SUPPERALLOYS NICKEL BASE PRODUCTION

The design of vacuum induction installations including the modern vacuum induction furnace VIM 12 III HMC ALD production (Germany) was considered. The VIM 12 III HMC installation has all necessary units and devices including transducers for oxidized melt measure and conforms to modern requirements for a vacuum equipment. The installation permits to design the new effective basic processes of last generation cast superalloys melting for single crystal casting and thereby to increase their operationale performances.

Keywords: superalloy, vacuum induction furnace, high quality, vacuum.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

ВИАМ является ведущим отечественным разработчиком литейных жаропрочных сплавов для турбинных и сопловых лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных энергетических газотурбинных установок (ГТУ) и единственным в Российской Федерации разработчиком жаропрочных сплавов для рабочих лопаток с монокристаллической структурой перспективных ГТД пятого и шестого поколений.

За последние годы в институте разработана целая гамма никелевых жаропрочных сплавов для монокристаллического литья (безуглеродистых, высокорениевых, рений- и рутенийсодержащих, интерметаллидных, коррозионностойких таких марок, как ЖСЗ6-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, ВЖМ6-ВИ, ВКНА-1В-ВИ, ВКНА-25-ВИ, ВИНЗ-ВИ, ЖСКС2-ВИ и др.), которые обладают уникальным сочетанием свойств, обеспечивающих работоспособность этих материалов при температурах газа 2000–2200 К, что позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики двигателей и самолетов [1–3].

Повышенная чистота высокожаропрочных литейных сплавов по примесям и газам, а также высокий уровень механических свойств и технологичность этих сплавов могут быть обеспечены только при использовании для их производства современных вакуумных плавильных установок [4–8].

В 2002 году в ВИАМ спроектирована, изготовлена, смонтирована и введена в эксплуатацию вакуумная индукционная печь ВИАМ-2002 (рис. 1). Установка предназначалась для разработки новых композиций сплавов, исследования и разработки технологии их выплавки и поставки опытных партий новых сплавов на моторостроительные заводы.



Рисунок 1. Общий вид вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002

За время эксплуатации установки ВИАМ-2002 с ее помощью проведены сотни плавов, что позволило разработать технологию выплавки никелевых жаропрочных

сплавов для монокристаллического литья и обеспечить новыми материалами производство современных ГТД [9–12]. В этой вакуумной индукционной печи проводилась также разработка технологии выплавки жаропрочных никелевых сплавов с использованием до 100% литейных отходов, в том числе некондиционных [13]. Однако конструкция данной установки имеет целый ряд недостатков и уже не соответствует требованиям к современному вакуумному плавильному оборудованию:

- установка периодического действия, т. е. после каждой плавки плавильная камера заполняется воздухом;
- из-за ненадежной работы дозатора все присадки добавляют через загрузочную камеру;
- система нагрева литниковой воронки с фильтром несовершенна [14];
- отсутствует система замера окисленности расплава (определение содержания кислорода в расплаве);
- отсутствует скребок для чистки стенок тигля после плавки;
- рабочий вакуум при плавке находится в пределах 10^{-2} – 10^{-3} мм рт. ст. (1,33–0,133 Па), что не обеспечивает полную дегазацию расплава [15, 16].

Поэтому возникла необходимость приобретения для работ, проводимых в ВИАМ, новой вакуумной индукционной печи, у которой должны отсутствовать вышеуказанные недостатки.

В результате проведенных переговоров с представителями фирмы ALD Vacuum Technologies GmbH (Германия) была согласована техническая спецификация и подписан контракт на поставку вакуумной индукционной печи VIM 12 III НМС для выплавки жаропрочных никелевых сплавов с емкостью тигля до 30 кг. Схема вакуумной индукционной печи VIM 12 III НМС представлена на рис. 2.

Установка VIM 12 III НМС полунепрерывного действия представляет собой двухкамерную горизонтальную конструкцию, в которой плавильная камера все время находится под вакуумом, а загрузка и выгрузка литейной оснастки в виде стальных труб осуществляется через камеру форм, отделенную от плавильной камеры вакуумным затвором.

Установка оснащена мощной высокопроизводительной вакуумной системой, состоящей из двух систем механических насосов (одна – для камеры плавления, другая – для камеры форм) и масляного бустерного насоса с номинальной всасывающей мощностью 4000 л/с. Вакуумная система позволяет обеспечить минимальную продолжительность вакуумирования для плавильной камеры и камеры форм, которая составляет не

более 7 мин. Конечный вакуум в плавильной камере составляет не более 0,8 мкм рт. ст. (0,1 Па).

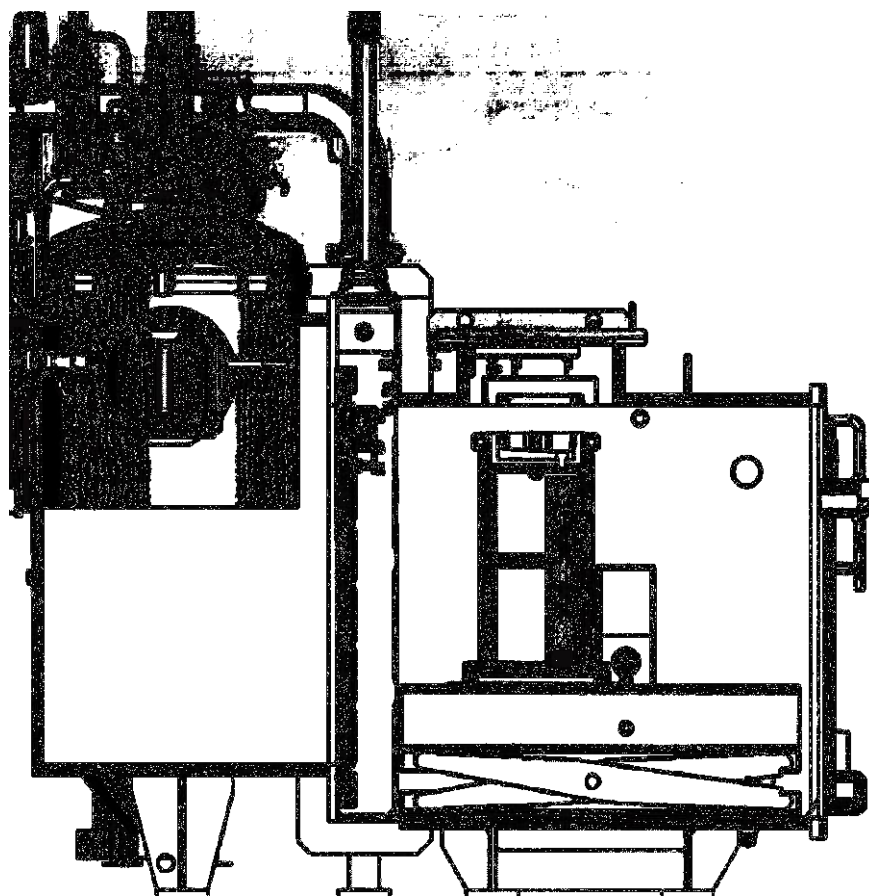


Рисунок 2. Схема вакуумной индукционной печи VIM 12 III HMC

В плавильной камере может размещаться керамический тигель емкостью 12 или 30 кг, в котором проводится плавка, с гидравлическим механизмом поворота тигля для заливки металла в трубу с внутренним диаметром 71 или 90 мм, закрепленную на тележке. Тележка перемещается по направляющим и используется для загрузки/выгрузки форм. После достижения соответствующего вакуума как в плавильной камере, так и в камере форм, вакуумный затвор открывается, и кассета перемещается в положение разливки.

В верхней части камеры форм расположен нагреватель сопротивления для нагрева промежуточного ковша (тандиша) с пенокерамическим фильтром до температуры 1000°C, который размещен сверху на трубной заготовке. После окончания нагрева тандиш перемещается через открытый вакуумный затвор из камеры форм в плавильную камеру для разливки.

Установка оборудована поворотным многоцелевым устройством револьверного типа, соединенным с крышкой камеры посредством вакуумного затвора, на котором

размещены: камера загрузки с загрузочными корзинами или пробоотборником; дозатор в виде вертикальной трубы с двумя отделениями для дозагружаемых материалов; одноканальная термопара погружения в виде трубки или многоканальная платиновродиевая термопара с защитным кварцевым колпачком. К адаптеру на конце штока может также крепиться измерительная трубка для одновременного замера активности кислорода в расплаве и температуры. При необходимости каждый из этих узлов устанавливается над загрузочным отверстием, после чего можно создавать вакуум с помощью общей вакуумной системы. На крышке плавильной камеры установлено устройство для осаждения шихты и скребок для чистки стенок тигля после слива металла.

Установка оснащена компьютерной системой, позволяющей управлять технологическим процессом. Блоки управления включают в себя устройства, необходимые для ввода и передачи команд, передачи сообщений о сбоях в системе, а также контроля и отображения на дисплее параметров состояния всех главных систем.

Система управления контролирует и фиксирует следующие параметры плавки:

- текущее время;
- давление остаточного воздуха во всех камерах печи;
- значение мощности преобразователя тока;
- значения температуры металла по ходу плавки;
- предыдущее замеренное натекание по давлению;
- текущее натекание по давлению;
- значения ЭДС – при замере степени окисленности металла;
- температура промежуточного ковша (тандиша);
- другие необходимые параметры для контроля состояния печи.

Установка VIM 12 III НМС отвечает всем самым современным требованиям к вакуумному оборудованию и позволяет выплавлять в ней новые высокожаропрочные сплавы последнего поколения с ультравысокой чистотой по примесям серы, фосфора, кислорода, азота, углерода и др., со стабильным химическим составом по всем легирующим элементам и минимальным количеством шлаковых и неметаллических включений. Это позволит разработать новые эффективные технологические процессы выплавки сплавов и, тем самым, дополнительно повысить их механические свойства и технологичность при отливке деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Сидоров В.В., Демонис И.М. Разработка монокристаллических высокотемпературных жаропрочных никелевых сплавов методом компь-

- ютерного конструирования /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Высокорегионные жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД. М.: ВИАМ. 2004. С. 22–36.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением //Металлы. 2006. №5. С. 47–57.
 3. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. II //Материаловедение. 1997. №5. С. 14–16.
 4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
 5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
 6. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Литейное производство. 2011. №10. С. 2–5.
 7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов /В сб. трудов науч.-технич. конф., посвященной 310-летию уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения. 2011. Т. 1. Екатеринбург: «Наука Сервис». 2011. С. 31–38.
 8. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов //Металлург. 2012. №5. С. 26–30.
 9. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорегиионного никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
 10. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокри-

- сталлической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 68–78.
 12. Герасимов В.В., Висик Е.М., Никитин В.А., Зернова М.Г. Опыт освоения технологии литья секторов сопловых лопаток с монокристаллической структурой из сплава ВКНА-4У //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 13–18.
 13. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Получение Re-Ru содержащего сплава с использованием некондиционных отходов //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 15–17.
 14. Сидоров В.В., Исходжанова И.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнелегированного никелевого расплава с повышенным количеством отходов //Электрометаллургия. 2011. №11. С. 17–21.
 15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 32–36.
 16. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2013. №8. С. 3–7.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Sidorov V.V., Demonis I.M. Razrabotka monokristallicheskikh vysokotemperaturnykh zharoprochnykh nikelovykh spлавov metodom komp'yuternogo konstruirovaniya [Development of single-crystal high-rhenium nickel superalloys by computer-aided design] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. Vysokotemperaturnye zharoprochnye splavy, tehnologiya i oborudovanie dlja proizvodstva spлавov i lit'ja monokristallicheskih turbinnykh lopatok GTD. M.: VIAM. 2004. S. 22–36.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Bronfin M.B., Alekseev A.A. Osobennosti monokristallicheskikh zharoprochnykh nikelovykh spлавov, legirovannykh reniem [Features single-crystal high-temperature nickel alloys alloyed with rhenium] //Metally. 2006. №5. S. 47–57.

3. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure]. Ch. II //Materialovedenie. 1997. №5. S. 14–16.
4. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
5. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologii ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
6. Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Organizacija proizvodstva lityh prutkovyh zagotovok iz sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnyh nikelovyh splavov [Organization of production of cast bar stock of modern casting nickel-base superalloys] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №10. S. 2–5.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovyh (shihtovyh) zagotovok iz sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnyh nikelovyh splavov [Production of cast semifinished (of charge) of the modern casting blanks nickel-base superalloys] /V sb. trudov nauch.-tehnic. konf., posvjashhennoj 310-letiju ural'skoj metallurgii i sozdaniju tehniko-vnedrencheskogo centra metallurgii i tjazhelogo mashinostroenija. 2011. T. 1. Ekaterinburg: «Nauka Servis». 2011. S. 31–38.
8. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Kablov D.E. Vysokojeffektivnye tehnologii i sovremennoe oborudovanie dlja proizvodstva shihtovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov [Enabling technologies and modern equipment for production of charge billets casting superalloys] //Metallurg. 2012. №5. S. 26–30.
9. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobennosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov <001> vysokorenievogo nikelovogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v uslovijah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Structure and properties of single crystals of high-temperature <001> high-rhenium nickel superalloy prepared under the high-gradient directional crystallization] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
10. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i

- kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of GTE blades with single crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
11. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Osobennosti tehnologii vyplavki i razlivki sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [Technology features modern smelting and casting casting nickel-base superalloys] //Vestnik MGTU im. N.Je. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 68–78.
 12. Gerasimov V.V., Visik E.M., Nikitin V.A., Zernova M.G. Opyt osvoenija tehnologii lit'ja sektorov soplovykh lopatok s monokristallicheskoj strukturoj iz splava VKNA-4U [Experience in developing casting technology sectors vane with single-crystal structure of the alloy VKNA-4U] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 13–18.
 13. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Min P.G., Kablov D.E. Poluchenie Re-Ru sodержashhego splava s ispol'zovaniem nekondicionnykh othodov [Preparation of Re-Ru-containing alloy using rejects] //Metallurgija mashinostroenija. 2012. №3. S. 15–17.
 14. Sidorov V.V., Ishodzhanova I.V., Rigin V.E., Folomejkin Ju.I. Ocenka jeffektivnosti fil'tracii pri razlivke slozhnolegirovannogo nikelovogo rasplava s povyshennym kolichestvom othodov [Evaluating the effectiveness of filtering in the casting of complex-nickel melt with an increased amount of waste] //Jelektrometallurgija. 2011. №11. S. 17–21.
 15. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Vlijanie primesi azota na strukturu monokristallov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS30-VI i razrabotka jeffektivnykh sposobov ego rafinirovanija [Influence of nitrogen impurities on the structure of single-crystal superalloy nickel alloy ZHS30-VI and develop effective ways of refining its] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 32–36.
 16. Kablov D.E., Chabina E.B., Sidorov V.V., Min P.G. Issledovanie vlijanija azota na strukturu i svojstva monokristallov iz litejnogo zharoprochnogo splava ZhS30-VI [Investigation of the influence of nitrogen on the structure and properties of single crystals of cast superalloy ZHS30-VI] //MiTOM. 2013. №8. S. 3–7.