

**ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ НАСОСОВ
ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru

Описаны способы и средства, направленные на повышение качества корпусных деталей турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя, которые представляют собой детали, отливаемые из алюминий-кремниевого сплава, наружная поверхность которых оформляется стенками литейной формы, а внутренняя – песчаным стержнем. При этом одной из проблем, связанных с литьем деталей из алюминиевых сплавов, в том числе и из алюминий-кремниевых сплавов, является пористость, источником которой служит водород. Образующиеся в процессе кристаллизации металла поры ослабляют сечение отливок, что снижает их механические свойства и ухудшает эксплуатационные характеристики ТНА. Другим дефектом отливок из алюминиевых сплавов является наличие рассеянных или сосредоточенных пустот, что связано с недостатком питания жидким металлом затвердевающего сплава.

Описаны мероприятия, направленные на предотвращение и устранение негативного влияния газово-усадочных дефектов в корпусных отливках ТНА, в результате реализации которых повысилось качество и уменьшилось количество забракованных корпусов: переводили получение отливок с литья в землю на литье в кокиль; на песчаных стержнях устанавливали «холодильники», которые усиливали теплоотвод от кристаллизующегося металла; рабочие поверхности кокиля покрывали специальным огнеупорным покрытием, что обеспечивало уменьшение теплоотвода и теплопередачу в направлении от нижней части кокиля к верхней; разработано устройство для охлаждения нижней части кокиля сжатым воздухом и нагрева верхней части электронагревателями; был создан температурный режима кокиля, обеспечивающий направленное затвердевание отливок корпуса.

Ключевые слова: корпус турбонасосного агрегата, литье, повышение качества.

Vestnik SibGAU
2014, No. 5(57), P. 174–179**THE EVOLUTION OF MANUFACTURE TECHNOLOGY
OF PUMP BODIES TURBO-PUMP ASSEMBLY LRE**

G. G. Krushenko

Institute Computational Modeling SB RAS,
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru

The article describes the methods and tools aimed at improving the quality of body parts turbo-pump assembly (TNA) liquid-propellant rocket engine, which represent parts molded from aluminum-silicon alloy, the outer surface of which is issued by the walls of the mold, and the inner – sand core. One of the problems associated with the casting of aluminum alloys, including aluminum-silicon alloys, is the porosity, the source of which is hydrogen. Pores, formed during crystallization of the metal, weaken the cross-section castings, which reduce their mechanical properties and affect the operational characteristics of TNA. Another defect casting of aluminum alloys is the presence of scattered or concentrated voids, due to the shortage of supply of liquid metal solidified alloy.

The activities, aimed at prevention and elimination of the negative influence of the gas-shrinkage defects in case castings TNA, the implementation of which has improved the quality and reduced the number of defective buildings: transferred obtaining castings from casting in the sand form of the in the metallic form; on a sand cores installed "refrigerators", which increased the dissipation heat from the crystallizing metal; working surfaces of the die was covered with a special refractory coating, which ensured the reduction of dissipation and heat transfer in the direction from the lower part to the upper die; developed device for cooling the lower part of the die with compressed air, and heating the upper part of the heaters was established temperature of the die, providing the directional solidification of the casting of the case TNA, are described.

Keywords: case turbo-pump assembly, casting, improving quality.

Введение. В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) подача необходимого количества компонентов топлива – горючего и окислителя – с заданным давлением в камеру сгорания осуществляется насосами, которые приводятся во вращение газовой турбиной. В совокупности насосы с газовой турбиной образуют единый энергетический узел – турбонасосный агрегат (ТНА) (рис. 1), который является одним из основных агрегатов ЖРД [1].

По своим характеристикам и, в частности, по удельной мощности ТНА значительно превосходят параметры энергетических машин авиационных и автомобильных двигателей или других энергетических установок наземной техники. Например, турбина ракетного двигателя РД170 имеет мощность $\sim 270\,000$ л. с., что составляет более 30 % мощности ДнепрогЭС, построенной в 30-е годы XX века. При этом собственная масса ТНА этого двигателя равна ~ 1900 кг, а $m_{\text{отн}}$ (отношение массы в граммах к мощности в л. с.) = $= 7$ г/ л. с., тогда как $m_{\text{отн}}$ автомобильных двигателей внутреннего сгорания составляет 1500...2000 г/ л. с., воздушно-реактивных двигателей – 200...400 г/ л. с. [1].

По условиям эксплуатации комплектующие ТНА детали делятся на подвижные (вращающиеся), к которым, в частности, относится вал с расположенными на нем рабочими колесами (ротор), и неподвижные – корпуса, внутри которых располагается ротор (рис. 1) [2].

Вращающиеся детали ТНА работают в исключительно жестких динамических условиях – скорость вращения ротора достигает 60 000 об/мин, вибрация находится в диапазоне частот от 10 до 10 000 Гц, число включений – от 4 до 20 000, числа циклов термомеханического, вибрационного, аэрогидродинамического нагружения – от 10 до 10^9 , скорость движения жидких компонентов топлива – до 200 м/с [3; 4]. Корпуса ТНА работают под высоким внутренним давлением, достигающим сотен атмосфер. Кроме того, они воспринимают и часть нагрузок, возникающих при вращении ротора. Мероприятия по повышению качества рабочих колес ТНА подробно описаны в работе [5]. В настоящей работе описаны способы и средства, направленные на повышение качества корпусных деталей ТНА, которые представляют собой отливку, наружная поверхность которой оформляется стенками литейной формы, а внутренняя – песчаным стержнем.

Для литья корпусов применяли доэвтектический алюминиево-кремниевый сплав, который характеризуется высокими технологическими и физико-механическими характеристиками, гарантирующими надежность их работы в сложнонагруженных условиях эксплуатации [3]. При этом одной из проблем, связанных с литьем деталей из алюминиевых сплавов, в том числе и из алюминиево-кремниевых сплавов, является пористость (пустоты в теле отливок, форма которых близка к глобулярной) [6], источником которой служит водород [7], поглощаемый расплавом из атмосферы и водородосодержащих соединений (формовочная смесь, шихтовые материалы, рафинирующие средства, футеровка печных агрегатов и др.) [8].

Образующиеся в процессе кристаллизации поры ослабляют сечение отливок, что снижает их механические свойства [9] и ухудшает эксплуатационные характеристики, например, герметичность – важнейшую характеристику корпусов ТНА. Даже минимальные отличия плотности сплава оказывают достаточно ощутимое влияние на уровень механических свойств отливок, что было установлено, например, в работе [10] на доэвтектическом алюминиево-кремниевом сплаве АК9ч (8,0–10,5 % Si; 0,17–0,30 % Mg; 0,20–0,50 % Mn; ост. – Al) при плотности отливок (определяли методом гидростатического взвешивания) $\rho = 2564$ кг/м³, временном сопротивлении $\sigma_B = 235$ МПа, относительном удлинении $\delta = 5,0$ %, тогда как при $\rho = 2575$ кг/м³ σ_B повысилось до 260 МПа (на 10,4 %), а δ – до 5,6 % (на 12,0 %), а при $\rho = 2658$ кг/м³ σ_B повысилось до 275 МПа (на 17,0 %), а δ – до 8,2 % (на 64,0 %). При этом плотность повысилась только на 0,43 %.

Проблема пористости решается путем введения в расплав хлорсодержащих соединений, например, хлористого магния $MnCl_2$, гексахлорэтана C_2Cl_6 и др. [11; 12]. В результате взаимодействия этих соединений с водородом образуются пары HCl , которые улетучиваются из расплава. Существуют и другие средства и способы дегазации алюминиевых расплавов, такие, например, как продувка хлором или азотом [13], вакуумирование [14], обработка током [15], ультразвуком [16] и др. В данной работе дегазацию расплава производили гексахлорэтаном.

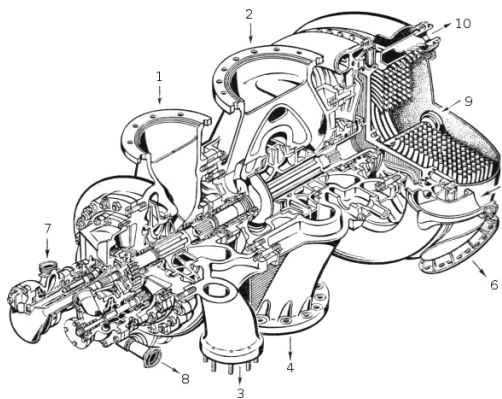


Рис. 1. ТНА ЖРД: корпус насоса горючего: 1 – подвод; 3 – отвод; корпус насоса окислителя: 2 – подвод; 4 – отвод [1]

Другим дефектом отливок из алюминиевых сплавов являются так называемые «усадочные» дефекты, присутствующие в виде рассеянных или сосредоточенных пустот, что связано с недостатком питания жидким металлом затвердевающего металла [17; 18]. При этом в усадочные пустоты может выделяться и присутствующий в жидком металле водород, образуя так называемые газово-усадочные пустоты [19].

Обеспечение надлежащего питания отливок производится разными способами, что можно проиллюстрировать на примере освоения литья корпусов ТНА из алюминий-кремниевый сплав, близкого по составу к американскому сплаву А356 (6,3–7,3 % Si; 0,25–0,45 % Mg; 0,2 % Ti), который также характеризуется склонностью к образованию усадочных дефектов [18].

Технология литья корпусов ТНА в песчано-глинистые формы. На начальном этапе освоения корпуса ТНА отливали в песчано-глинистые формы, спецификой применения которых является медленный отвод тепла от кристаллизующегося металла, что нарушает правило направленного затвердевания металла и вызывает появление усадочных дефектов в тепловых узлах отливок в виде раковин и пористости. Выявление и возможное исправление таких дефектов особенно важно при использовании литых деталей в составе изделий, работающих в сложнагруженных условиях эксплуатации. Одним из эффективных способов обнаружения дефектов является рентгенография [20]. Рентгеновским излучением можно просвечивать отливки с толщиной стенки в несколько десятков миллиметров. Прошедшее через деталь излучение попадает на фотопленку, засвечивая ее. Если в отливке имеется дефект, то излучение меньше поглощается в этом месте и, следовательно, сильнее засвечивает пленку, создавая на ней черное пятно, свидетельствующее о внутреннем дефекте.

С целью оценки соответствия качества корпусов требованиям технической документации их после выбивки стержней и отрезания литниково-питающей системы подвергали 100-процентному рентгенопросвечиванию [21]. При этом внутрь отливки помещается рентгеновская пленка, предварительно вложенная в пакет из непрозрачной для света черной бумаги, причем его располагают так, чтобы он полностью прилегал к внутренней стенке детали, что осуществляется с применением разных методов фиксирования. Просвечивание производилось с помощью промышленного рентгеновского острофокусного аппарата РУП-200. Режим просвечивания (длительность экспозиции и мощность излучения) подбирается в зависимости от толщины стенки отливки.

После просвечивания пленка проявляется и изучается на предмет наличия дефектов, фиксирующихся в виде темных пятен. Для уточнения места нахождения дефекта на то место отливки, где он обнаружен в виде темного пятна, с помощью пластилина прикрепляется свинцовая «метка» (крестик), и это место повторно просвечивается. Ввиду того, что рентгеновские лучи не проходят сквозь свинец, метка фиксируется на пленке в виде белого крестика. Иногда приходится выполнять эту операцию несколько раз. После уста-

новления точных координат и контуров дефекта металл в этом месте вырубается на нужную глубину до плотного металла, место вырубки зачищается и производится его заварка по аналогичной технологии [22], затем деталь снова просвечивают с целью гарантии устранения дефекта.

Заварку вырубленных мест производили без подогрева отливок с применением аргодуговой сварки плавящимися электродами, которые с целью получения мелкокристаллической (модифицированной) структуры отливали из этого же сплава в холодные чугунные изложницы, причем сечение электродов имело овальную форму (большая ось – 10 мм, меньшая – 5 мм), что позволяло более точно формировать завариваемое место.

При заварке сквозных дефектов, а также дефектов, после удаления которых толщина стенки отливки не превышает 3 мм, применяли подкладки из материала отливки, а также из смеси песка с жидким стеклом. После заварки и удаления подкладок производили зачистку и подварку отливки с обратной стороны стенки. При обработке технологии измерялась электропроводимость заваренных мест и литого материала отливки с целью проверки адекватности химического состава наплавленного материала. Количество и площади допускаемых таким способом исправлений строго ограничиваются приемной документацией.

Затем отливки проходили весь цикл технологических операций как в литейном цехе (термическая обработка), так и в механических цехах (обработка резанием), после чего проходили испытания на герметичность, результаты которых являлись окончательным контролем для пропуска детали на сборку.

Аналогичная технология применяется для выявления и устранения литейных дефектов в кокильных отливках (рис. 2) корпуса коробки перемены передач (transmission case casting) автомобилей, производимых фирмой Nissan Casting Australia Pty Ltd. (NCAP) [23] из сплава системы Al–Si–Mg, близкого по составу к сплавам корпусов ТНА.



Рис. 2. Отливка корпуса коробки передач автомобиля фирмы Nissan Casting Australia Pty Ltd. (NCAP) [23]

Технология литья корпусов ТНА в металлическую форму. Однако ввиду достаточно больших трудозатрат по заварке дефектов корпусов, отливаемых в песчано-глинистые формы, а также относительно большого количества отливок с неисправимыми дефектами, было принято решение перевести их на литье в металлическую форму (кокиль) [24], для реализации чего был изготовлен механизированный кокиль

с вертикальным разъемом полуформ с помощью гидравлики. При этом проектирование, изготовление кокиля и освоение по сути новой технологии, причем в сжатые сроки, оказалось достаточно трудоемким мероприятием. Однако в результате стало возможным повысить качество отливок как за счет увеличения скорости охлаждения металла, что приводит к формированию мелкокристаллической структуры отливки и, как результат, получению отливок с более высокими механическими свойствами [25], так и за счет уменьшения брака по засорам формовочной смесью.

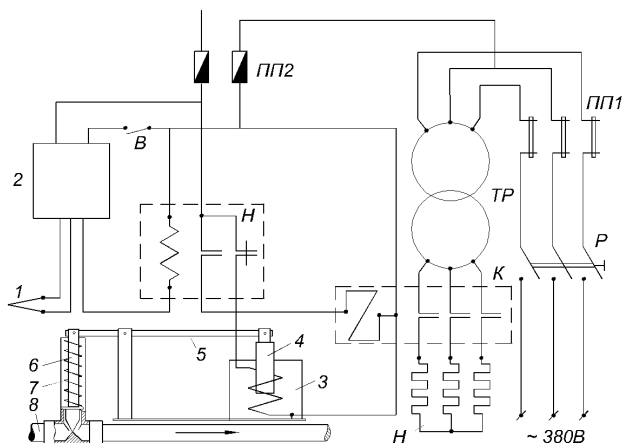


Рис. 3. Схема включения автомата регулирования температуры кокиля в цепь электронагревателя: 1 – терморезистор; 2 – пирометрический прибор; 3 – соленоид; 4 – сердечник соленоида; 5 – рычаг; 6 – шток; 7 – пружина; 8 – трубка подачи воздуха; ПП1 и ПП2 – плавкие предохранители; Р – рубильник; Тр – трансформатор; К – катушка контактора; Н – электронагреватель [27]

Кроме того, изучение рентгеновских пленок позволило установить закономерности распределения усадочных дефектов в отливках, после чего с целью предупреждения их возникновения были выполнены приведенные ниже мероприятия:

- на песчаных стержнях, которые оформляют внутреннюю полость отливки, устанавливали так называемые «холодильники» – металлические пластины, повторяющие конфигурацию поверхности стенки, назначение которых заключается в усилении теплоотвода от кристаллизующегося металла;

- для покраски рабочих поверхностей кокиля применили хорошо себя зарекомендовавшую при литье из алюминиево-кремниевых сплавов деталей двигателей летательных аппаратов огнеупорную краску (оксид цинка ZnO – 5,76 %; диоксид титана TiO_2 – 3,85 %; черный графит – 1,92 %; жидкое стекло Na_2SiO_3 – 11,54 %; вода – 76,9 %) [26] и способ ее нанесения с увеличением слоя от нижней к верхней части кокиля, что обеспечивало уменьшение теплоотвода и теплопередачи в направлении от нижней его части к верхней;

- с помощью принудительного охлаждения нижней части кокиля сжатым воздухом (схема устройства и принцип работы поясняется на рис. 3. [27]) и нагрева

верхней части электронагревателями был создан температурный режим кокиля – от более низкой температуры в его нижней части к более высокой – в верхней.

Заключение. В результате выполнения ряда мероприятий, которые заключаются в замене песчано-глинистой формы на металлическую, установке на песчаный стержень «холодильников», окраске рабочей поверхности формы специальной огнеупорной краской и в применении охлаждения формы сжатым воздухом, было создано направленное затвердевание металла в форме при литье корпусов ТНА из алюминиево-кремниевого сплава, что привело к повышению качества и уменьшению количества забракованных деталей.

Библиографические ссылки

1. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО «Энергомаш» / В. К. Иванов [и др.] // Конверсия в машиностроении. 2006. № 1. С. 15–21.
2. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев [и др.]. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.
3. Прочность и ресурс ЖРД / Н. А. Махутов [и др.]. М. : Наука, 2011. 525 с.
4. Karimi H., Nassirharand A., Mohseni M. Modeling and simulation of a class of liquid propellant engine pressurization systems // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66, iss. 3–4. P. 539–549.
5. Крушенко Г. Г., Резанова М. В. Повышение качества рабочих колес и уменьшение припусков на обработку резанием вала ТНА ЖРД // Вестник БГТУ. 2014. № 21. С. 119–121.
6. Ammar H. R., Samuel A. M., Samuel F. H. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys // International Journal of Fatigue. 2008. Vol. 30, iss. 6. P. 1024–1035.
7. Чернега Д. Ф., Бялик О. М. Водород в литейных алюминиевых сплавах. Киев : Тэхніка, 1972. 148 с.
8. On-line prediction of the melt hydrogen and casting porosity level in 319 aluminum alloy using thermal analysis / A. Mitrasinovic [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2006. Vol. 428, iss. 1–2. P. 41–46.
9. Porosity reduction and mechanical properties in die engine blocks / M. A. Irfan [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 535. P. 108–114.
10. Влияние положения в форме литых испытательных образцов на механические свойства алюминиевых сплавов / З. А. Василенко [и др.] // Проблемы прочности. 1992. № 1. С. 80–82.
11. Крушенко Г. Г., Кузнецов А. Н., Гуревич В. А. Оценка рафинирующей способности флюсов // Цветная металлургия. 1973. № 6. С. 41–43.
12. Influences of different degassing processes on refining effect and properties of 4004 Al alloy / Wang Liping [et al.] // CHINA FOUNDRY Research & Development. 2013. Vol. 10, № 2. P. 104–107.
13. Макаров Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. М. : Металлургия, 1983. 120 с.

14. Вакуумирование алюминиевых сплавов / М. Б. Альтман [и др.]. М. : Metallurgiya, 1977. 240 с.
15. Воздействие постоянного электрического тока на эффект модифицирования и свойства сплава АЛ2 / Г. Г. Крушенко [и др.] // Литейное производство. 1974. № 12. С. 17–18.
16. Крушенко Г. Г., Иванов А. А. Виброимпульсная дегазация алюминиевых сплавов на примере сплава АЛ2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 1992. № 1–2. С. 146–148.
17. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Л. : Машиностроение. 1976. 216 с.
18. Simulation of unconstrained solidification of A356 aluminum alloy on distribution of micro/macro shrinkage / Н. Bayani [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2014. Vol. 3, iss. 1. P. 55–70.
19. Knipp E. Fehlererscheinungen an Gusstücken. Dusseldorf : Giesserei. Verlag GmbH, 1961. 273 s.
20. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М. : Атомиздат, 1977. 480 с.
21. Крушенко Г. Г., Кашубский А. Н. Применение рентгенографии для выявления и заварки дефектов в отливках ответственного назначения из алюминиево-кремниевых сплавов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 8. С. 47–49.
22. Пат. 2109611 Российская Федерация. Способ заварки дефектов в отливках из алюминиевых сплавов / Шевелкин В. И., Шуляковский О. Б., Булатов В. П. 2002. Бюл. № 31.
23. Effect of melt cleanliness on the formation of porosity defects in automotive aluminium high pressure die castings / С. Tian [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 122, iss. 1. P. 82–93.
24. Литье в кокиль / С. Л. Бураков [и др.]. М. : Машиностроение. 1980. 415 с.
25. Вейник А. И. Кокиль. Минск : Наука и техника. 1980. 352 с.
26. А. с. № 126237 СССР. Защитная краска для кокиля / С. С. Писаревский, Б. Я. Соснин, Г. Г. Крушенко и др. 1960. Бюл. № 4.
27. Крушенко Г. Г. Автоматическое регулирование охлаждения литейной металлической формы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 4. С. 105–106.
- surization systems. *Acta Astronautica*. February-March 2010. Vol. 66, Is. 3–4, P. 539–549.
5. Krushenko G. G., Rezanova M. V. [Improving the quality of impellers and the reduction of allowances on the cutting shaft TNA LRE]. *Vestnik BGTU*, 2014, no. 21, P. 119–121 (In Russ.).
6. Ammar H. R., Samuel A. M., Samuel F. H. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys. *International Journal of Fatigue*. June 2008, Vol. 30, Is. 6, P. 1024–1035.
7. Chernega D. F., Bjalik O. M. *Vodorod v litejnyh aljuminievyh splavah*. [Hydrogen in casting aluminum alloys]. Kiev, Tekhnika Publ., 1972, 148 p.
8. Mitrasinovic A., Hernández F. C. R., Djurdjevic M. et al. On-line prediction of the melt hydrogen and casting porosity level in 319 aluminum alloy using thermal analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 25 July 2006, Vol. 428, Is. 1–2, P. 41–46.
9. Irfan M. A., Schwam D., Karve A. et al. Porosity reduction and mechanical properties in die engine blocks. *Materials Science and Engineering A*. 15 February 2012, Vol. 535, P. 108–114.
10. Vasilenko Z. A., Krushenko G. G., Balashov B. A. et al. [The influence of the position in the form of cast test samples for mechanical properties of aluminium alloys]. *Problemy prochnosti*, 1992, no. 1, P. 80–82 (In Russ.).
11. Krushenko G. G., Kuznecov A. N., Gurevich V. A. [Evaluation of the refinement ability fluxes]. *Tsvetnaya metallurgiya*, 1973, no. 6, P. 41–43 (In Russ.).
12. Wang Liping et al. Influences of different degassing processes on refining effect and properties of 4004 Al alloy. *CHINA FOUNDRY Research & Development*. March 2013, Vol. 10, no. 2, P. 104–107.
13. Makarov G. S. *Rafinirovanie alyuminievykh splavov gazami* [Refining aluminum alloys gases]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 120 p.
14. Al'tman M. B., Glotov E. B., Zasytkin V. A. et al. *Vakuumirovanie alyuminievykh splavov* [The degassing of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 240 p.
15. Krushenko G. G., Guljaev B. B., Dutov V. M. et al. [The influence of a constant electric current to the effect of the modification and properties of the alloy AL2]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1974, no. 12, P. 17–18 (In Russ.).
16. Krushenko G. G., Ivanov A. A. [Vibration-impulse degassing of aluminum alloys for example alloy AL2]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 1992, no. 1–2, P. 146–148 (In Russ.).
17. Guljaev B. B. *Teoriya litejnykh protsessov* [The theory of foundry processes]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976, 216 p.
18. Bayani H., Mirbagheri S. M. H., Barzegari M. et al. Simulation of unconstrained solidification of A356 aluminum alloy on distribution of micro/macro shrinkage. *Journal of Materials Research and Technology*. January–March 2014, Vol. 3, Is. 1, P. 55–70.
19. Knipp E. Fehlererscheinungen an Gusstücken. – Dusseldorf: Giesserei. Verlag GmbH, 1961, 273 p.

References

1. Ivanov V. K., Kashkarov A. M., Romasenko E. N. i dr. [Turbopump units LRE design NPO Energomash]. *Konversija v mashinostroenii*, 2006, no. 1, P. 15–21 (In Russ.).
2. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A. i dr. *Tehnologija proizvodstva zhidkostnyh raketnyh dvigatelej*. [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 2008. 381 p.
3. Mahutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M. i dr. *Prochnost' i resurs ZhRD*. [Strength and resource LRE]. Moscow, Nauka Publ., 2011, 525 p.
4. Karimi H., Nassirharand A., Mohseni M. Modeling and simulation of a class of liquid propellant engine pres-

20. Rusakov A. A. *Rentgenografiya metallov* [Radiography of metals]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 480 p.
21. Krushenko G. G., Kashubskiy A. N. [The use of radiography to detect and welding defects in the super-duty casting of aluminum-silicon alloys]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2010, no. 8, P. 47–49 (In Russ).
22. Shevelkin V. I., Shulyakovskiy O. B., Bulatov V. P. *Sposob zavarki defektov v otlivkah iz aljuminievyh splavov* [Method of welding defects in the casting of aluminum alloys]. Patent RF, no. 2109611, 2002.
23. Tian C., Law J., Touw V. D. et al. Effect of melt cleanliness on the formation of porosity defects in automotive aluminium high pressure die castings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, Vol. 122, Is. 1, P. 82–93.
24. Burakov S. L., Veynik A. I., Dubinin N. P. et al. *Lit'e v kokil'* [Gravity die casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 415 p.
25. Veynik A. I. *Kokil'* [Chill mould]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1980, 352 p.
26. Pisarevskiy S. S., Sosnin B. Ya., Krushenko G. G. et al. *Zashchitnaya kraska dlya kokilya* [Protective paint to chill mould]. Patent RF, no. 12637, 1960.
27. Krushenko G. G. [Automatic control of cooling of the casting metal forms.]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2008, no. 4, P. 105–106 (In Russ).