

УДК 004.9:629.7.03

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ LVM Flow CV**

Л. А. Оборин<sup>1</sup>, В. А. Колмыков<sup>2</sup>, В. П. Жереб<sup>3</sup>, М. Е. Шилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: shilovamashka@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО «Красмаш»  
Российская Федерация, 660123, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: kras@krasmail.ru

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660025, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95  
E-mail: vpzhereb@rambler.ru

*С использованием компьютерного моделирования, с помощью системы LVM Flow CV исследован процесс затвердевания отливок из стали типа ВНЛ. Обнаружены процессы неустойчивого поведения фронта кристаллизации расплава в течение первых 50 с, сопровождающиеся значительными колебаниями температуры и количества затвердевшего металла, которые связываются с газовыделением на фронте кристаллизации и значительной величиной изменения энтальпии кристаллизации. Предложено проводить плавку в вакууме и использовать материал формы с более высокой теплоаккумулирующей способностью. Компьютерное моделирование для этих условий показало возможность более монотонного изменения температуры и величины закристаллизовавшейся части расплава в начальный период кристаллизации, сокращение на 60 % продолжительности периода кристаллизации и создание благоприятных условий для охлаждения отливки. Достоверность компьютерных экспериментов подтверждается хорошим количественным совпадением температур кристаллизации по данным компьютерного моделирования и результатов термического анализа реального сплава.*

*Ключевые слова:* литье по выплавляемым моделям, компьютерное моделирование кристаллизации сплава типа ВНЛ, система компьютерного моделирования LVM FLOW CV.

**IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF CASTINGS TURBOPUMP ASSEMBLY AIRCRAFT POWER PLANTS USING THE COMPUTER SIMULATION SYSTEM LVM Flow CV**

L. A. Oborin<sup>1</sup>, V. A. Kolmykov<sup>2</sup>, V. P. Zhereb<sup>3</sup>, M. E. Shilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation  
E-mail: shilovamashka@mail.ru

<sup>2</sup>JSC "KRASMASH"  
29, Krasnoyarskiy Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: kras@krasmail.ru

<sup>3</sup>Siberian Federal University  
95, Krasnoyarskiy Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation  
E-mail: vpzhereb@rambler.ru

*The process of solidification of steel castings such as VNL was investigated by the computer simulation using the system LVM Flow CV. Processes of erratic behavior of the melt crystallization front for the first fifty seconds, accompanied by a significant fluctuations in temperature and solidified metal, which bind to the gas evolution at the solidification front and the substantial value of the enthalpy change of crystallization were found. It is proposed to conduct melting in vacuum and use the mold material with a high heat storage capacity. Computer simulation for these conditions showed a monotonic possible temperature and magnitude of melt crystallized in an initial stage of crystallization, reducing by 60 % the duration of the period of crystallization and the creation of favorable conditions for the cooling of the casting. The reliability of the computer simulations was confirmed by the good quantitative agreement between the crystallization temperature according to the results of computer simulation and thermal analysis of the real alloy.*

*Keywords:* investment casting, computer simulation of crystallization of the alloy type VNL, computer simulation system LVM Flow CV.

Надежность силовых установок (СУ) летательных аппаратов в значительной мере определяется конструктивной прочностью и герметичностью деталей турбонасосного агрегата (ТНА). Применение литейных технологий для изготовления деталей ТНА позволяет удовлетворить весь комплекс требований конструкторской документации (КД) и значительно снизить производственные затраты, при условии успешного решения задачи существенного повышения качества отливок, получаемых с помощью литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Используемые для изготовления литых деталей ТНА высокопрочные коррозионно-стойкие стали ВНЛ и сплавы на основе никеля склонны в процессе затвердевания к образованию внутренних дефектов разной природы, в частности, дефектов усадочного характера. Одним из путей эффективного снижения уровня таких дефектов и обеспечения требований КД к герметичности и конструктивной прочности литых деталей ТНА является реализация процесса управляемого затвердевания отливки.

Разработка такой технологии для сложных по геометрическим элементам отливок в ЛВМ с помощью традиционных технологических средств сопряжено с существенными техническими ограничениями и неприемлемыми затратами времени и средств. Поэтому для реализации требований КД был применен визуализированный метод компьютерного моделирования с помощью программного пакета LVM Flow CV [1], адаптированный для процесса изготовления литых деталей ТНА СУ летательных аппаратов.

Цель компьютерных экспериментов состояла в определении основных характеристик протекания процесса кристаллизации в разных частях отливок [2], в частности, определение изменений температуры и других характеристик расплава, двухфазной зоны и полученной отливки во времени, и выявлении основных причин появления дефектов. Определение температуры проводили с помощью виртуальных термопар, расположенных в местах тонких элементов отливки, на границах взаимодействия литейной формы и расплава, в нижней части отливки (рис. 1).

На первом этапе осуществляли моделирование плавки в открытой индукционной печи (ОИП). По результатам проведенного компьютерного моделирования обнаружен немонотонный характер понижения температуры расплава в первые 75 с (рис. 2). Сложный характер изменения температуры отливки при плавке в открытой индукционной печи сопровождается скачкообразными изменениями доли закристаллизованного металла в интервале до 80 с, наблюдаемыми на кривых образования твердой фазы, представленных на рис. 3. Взаимозависимость этих особенностей на указанных кривых, по-видимому, связана с протекающими одновременно процессами тепло- и газовой выделений при кристаллизации расплава. Случайная локализация процесса выделения растворенных в расплаве газов при его охлаждении и кристаллизации, по-видимому, сопровождается понижением теплопроводности и нарушением всей динамики процесса теплопередачи при охлаждении и кристаллиза-

ции отливки. Пульсирующий характер изменений доли закристаллизованного металла (рис. 3) и режима объемной усадки сопровождается образованием внутренних дефектов – окисной пленки, рыхлоты, пористости.

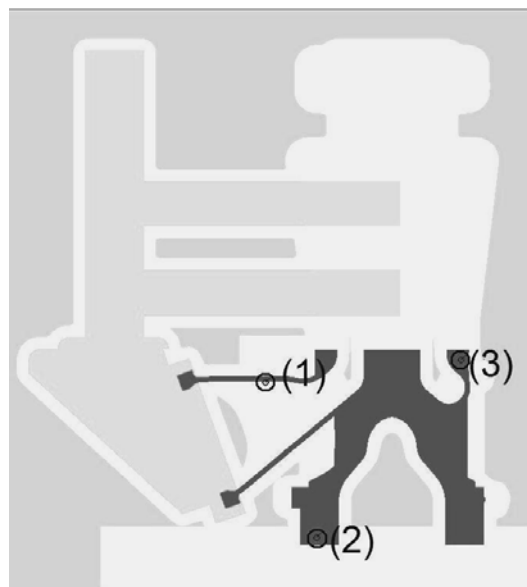


Рис. 1. Схема расположения виртуальных термопар на сечении отливки «корпус»:

1 – в тонком сечении отливки; 2 – в нижней части отливки; 3 – в широком сечении отливки

Для снижения количества растворенных в расплаве газов плавку в ОИП заменили на плавку в закрытой вакуумной индукционной печи (ВИП), а для улучшения тепловых условий в процессе охлаждения осуществили повышение термической емкости материала литейной формы. Для этого предусмотрели утепление тонких стенок отливки, тем самым усреднив их толщины по отношению к остальным элементам отливки, а также установили в нижней части холодильник в виде чугунной дробы.

Результаты компьютерного моделирования исследуемого процесса в новых условиях, представленные на рис. 4 и 5, указывают на следующие существенные изменения. Значительно сокращается по времени (до 25 с) и приобретает монотонный характер процесс охлаждения расплава до температуры кристаллизации во всех местах установки виртуальных термопар и уменьшается интервал времени существования двухфазной зоны (рис. 4).

Отсутствие газовой выделений и уменьшение теплоаккумулирующей способности оболочки позволило полностью скомпенсировать  $\Delta H_{\text{крист}}$ , что проявляется в монотонном характере изменения доли твердой фазы во времени. Процесс формирования твердой фазы по данным рис. 5 протекает стационарно без заметных изменений пульсаций во всех исследованных местах и завершается через 450 с. Количественные оценки указывают на уменьшение на 40–50 % дефектов усадочного характера при вакуумной выплавке с применением дополнительных технологических приемов.

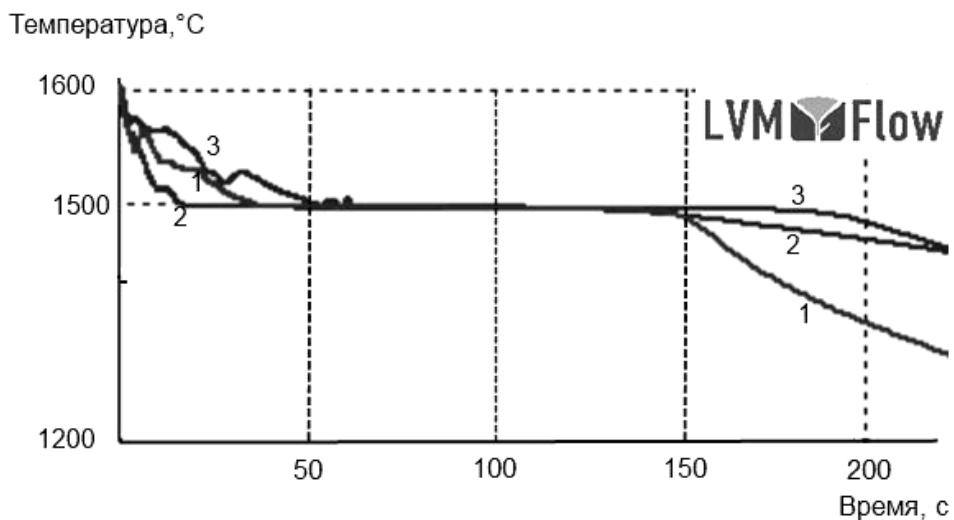


Рис. 2. Изменение температуры в отливке в открытой индукционной печи:  
 1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

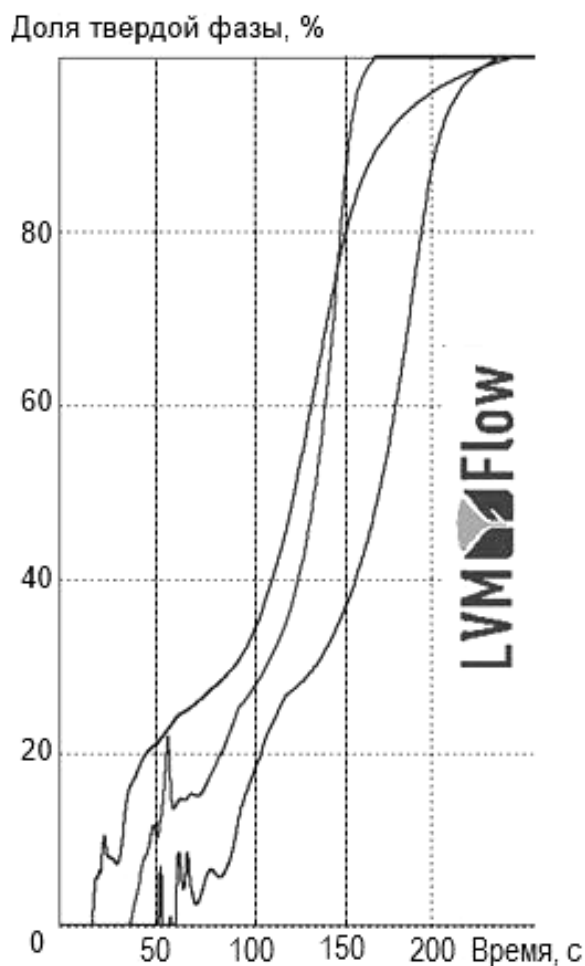


Рис. 3. Изменение доли твердой фазы при плавке в ОИП:  
 1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

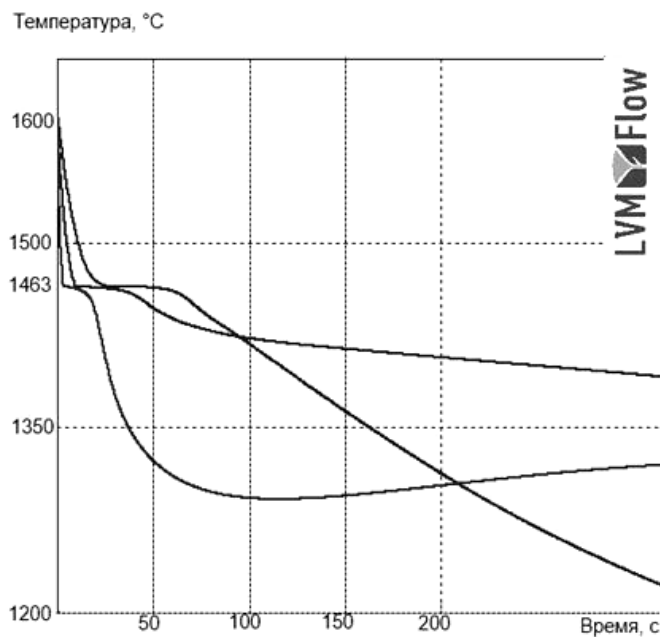


Рис. 4. Изменение температуры в отливке в вакуумной индукционной печи:  
 1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

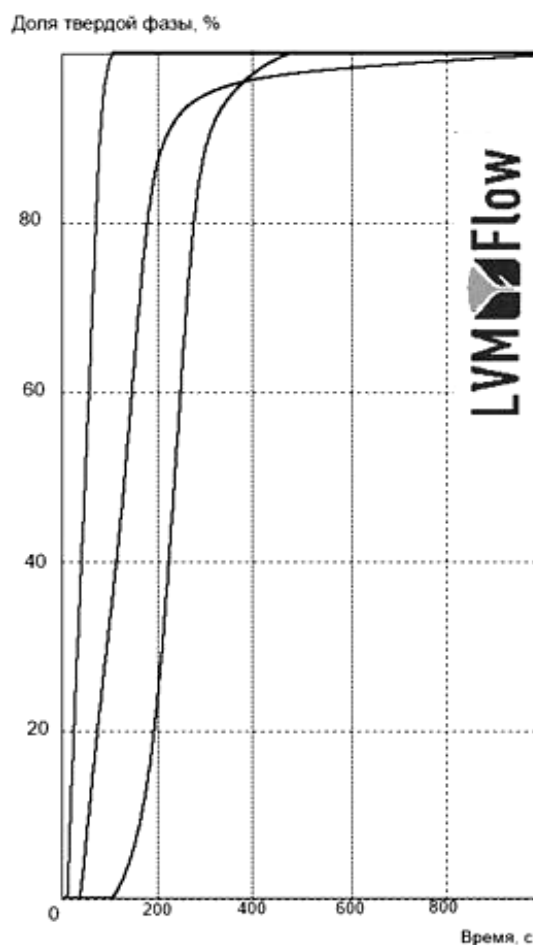


Рис. 5. Изменение доли твердой фазы при плавке в ВИП:  
 1 – термопара, установленная в тонком элементе отливки; 2 – термопара, установленная в нижней части отливки; 3 – термопара, установленная на границе взаимодействия литейной формы и расплава

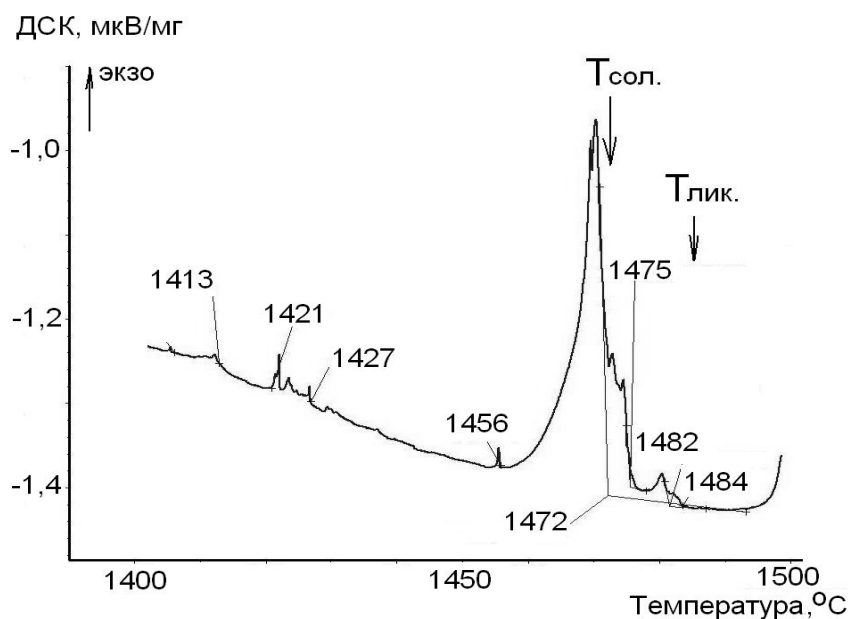


Рис. 6. Термограмма кристаллизации стали ВНЛ-6  
Интервал  $\Delta T = T_{лик} - T_{сол} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$  – двухфазная зона

Термический анализ процесса кристаллизации стали ВНЛ-6, выполненный в [3], указывает на температуру солидуса  $T_{сол} = 1475 \text{ }^\circ\text{C}$ . Более низкотемпературные экзотермические эффекты, показанные на рис. 6, связаны с субсолидусными превращениями. Температурные кривые, полученные в результате компьютерного моделирования и представленные на рис. 2 и 4, указывают на температуры кристаллизации расплава  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $1463 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно, что хорошо совпадает с результатами термического анализа реального расплава и позволяет надеяться на аналогичную достоверность результатов компьютерного моделирования.

Выполненное исследование также показало, что для литых деталей особой геометрической сложности (пространственные необрабатываемые поверхности, протяженные тонкие стенки, массивные фланцы) характерна объемная модель затвердевания, а не направленная или зонная.

Таким образом, компьютерное моделирование обеспечивает возможность виртуального анализа поведения металла в кристаллизующейся отливке и возможность оптимизации процесса за счет выбора условий. Для существенного сокращения количества усадочных дефектов – пор и рыхлот и организации эффективного теплопереноса необходимо применения дополнительных приемов:

- максимально возможное применение ВИП устарения окисных плен и создания условий ламинарного течения расплава в ОФ;
- применение холодильников;
- утепление материалами, с повышенными теплоаккумулирующими характеристиками в сравнении с материалом огнеупорной формы.

#### Библиографические ссылки

1. Журавлев В. А., Сухих С. М. Машинное моделирование формирования распределенной пористости и усадочной раковины при кристаллизации сплавов в слитки // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 80–84.
2. Борисов В. Т., Журавлев В. А., Колодкин В. М. Исследование напряжений и деформаций в ограниченной области, претерпевающей последовательную кристаллизацию // Прикладная механика. 1979. Т. 15, № 8. С. 65–71.
3. Оборин Л. А., Бабицкий Н. А., Жереб В. П. Термические превращения литейных высокопрочных сталей (ВНЛ) и жаропрочных сплавов (ВЖЛ) при плавлении и кристаллизации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. Т. 5, № 7. С. 724–730.

#### References

1. Zhuravlev V. A., Suhikh S. M. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1981, № 1, p. 80–84.
2. Borisov V. T., Zhuravlev V. A., Kolodkin V. M. *Prikladnaja mehanika.* 1979, vol. 15, № 8, p. 65–71.
3. Oborin L. A., Babickii N. A., Zhereb V. P. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii.* 2012, vol. 5, № 7, p. 724–730.

© Оборин Л. А., Колмыков В. А.,  
Жереб В. П., Шилова М. Е., 2013