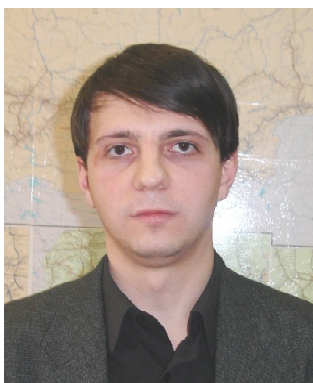




Чернов Николай Меркурьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения. В 1966 г. окончил Красноярский институт цветных металлов им. М.И. Калинина. С 1960 по 2001 г. работал на Красноярском машиностроительном заводе, металлургическом заводе «Сиб-электросталь», горно-химическом комбинате, НАПО им. В.П. Чкалова. С 2001 г. работает в СГУПСе. Имеет 88 печатных работ, в том числе 15 авторских свидетельств и патентов, является автором 1 монографии.



Медведев Константин Александрович родился в 1980 г. В 2003 г. окончил Сибирский государственный университет путей сообщения. В 2006 г. защитил диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата технической наук. В настоящее время — доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», имеет 20 печатных работ.

УДК 621.74.045

Н.М. ЧЕРНОВ, К.А. МЕДВЕДЕВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И РЕГЛАМЕНТА ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (ЛВМКД)

В статье представлены результаты экспериментальных исследований режимов технологического процесса ЛВМКД коррозионно-стойких сталей, разработанная методика проектирования технологического процесса и технологический регламент изготовления ЛВМКД отливок из коррозионно-стойких сталей.

Коррозионно-стойкие стали 08X18H10T, 0X18H10Б применяют в производстве деталей энергомашиностроения и других отраслях промышленности.

Изделия энергомашиностроения имеют сложную конфигурацию в виде цилиндров, колец, патрубков с внутренними перегородками или ребрами и содержат плоские протяженные поверхности с тонкими стенками. Их изготавливают из проката или поковок механической обработкой с последующей сваркой. В результате многостадийного процесса изготовления деталей или узлов велики безвозвратные потери высоколегированной стали при производстве слитков, поковок, листового или сортового проката, рубке заготовок из листа и механической обработке на стружку. Производство характеризуется высокой трудоемкостью изготовления и контроля полуфабрикатов и изделий.

В процессе изготовления изделия подвергаются многократному нагреву и деформациям, в результате сталь теряет пластичность, снижается уровень усталостной и коррозионной долговечности. Их масса завышена из-за требований

упрощения конструкции детали и потерь потенциала механических и коррозионных свойств в процессе многократных технологических переделов.

Поэтому в производстве изделий энергомашиностроения, к которым предъявляются высокие требования по плотности, коррозионной стойкости и к уровню механических свойств, перспективно применение технологии литья по выплавляемым моделям с кристаллизацией под давлением (ЛВМКД).

Сущность процесса ЛВМКД состоит в том, что металл из плавильной печи переливают в металлоприемник, а затем под давлением заполняют керамическую форму (КФ), которое сохраняют до конца затвердевания отливки [1].

Для обоснованного принятия решения о переводе штамповарных узлов на литье провели опытные работы по изготовлению типовой детали «корпус» методом ЛВМКД.

Корпус из стали 08X18H10T изготавливают из двух поковок, соединенных между собой сваркой. Далее после механической обработки внутрь большего цилиндра вваривают 4 ребра толщиной 5 мм, которые изготавливают посредством механической обработки из листового проката. Опытную партию корпусов заливали сталями 12X18H9ТЛ и 10X18H11БЛ с химическим составом по ГОСТ 977–88 без механической обработки внутренней поверхности и с минимальными припусками с внешней стороны, равными 2,5 мм.

При проведении опытных работ совершенствовали технологические процессы плавки сталей 12X18H9ТЛ и 10X18H11БЛ и изготовления КФ.

Методом компьютерного моделирования с использованием программного продукта НПО МКМ «LVMFlow» исследовали температурные поля в металлоприемнике и отливке.

Химический состав сталей определяли в процессе плавки и окончательно на квантometре ДФС-36 и экспресс-анализаторе углерода АН 7028. Механические свойства — по литым заготовкам образцов, прилитых к детали размерами $\varnothing 11$ мм и длиной 55 мм для испытаний на растяжение и сечением 11×11 мм длиной 55 мм для испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 977–88.

Внутренние дефекты отслеживали до и после механической обработки радиографическим методом, поверхностные — методом люминесцентного контроля (люмконтроля).

Плотность стали 12X18H9ТЛ и 10X18H11БЛ определяли гидростатическим взвешиванием образцов, изготовленных ЛВМ и ЛВМКД.

Стали 12X18H9ТЛ и 10X18H11БЛ плавил в высокочастотной индукционной печи ИСТ-016 с источником питания повышенной мощности ТПЧТ-320.

Для повышения жесткости крепления индуктора в корпусе печи верхнюю асбестоцементную плиту заменили на алюминиевую тонкостенную с ребрами жесткости.

Тигель футеровали плавленными шпинельными порошками ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$) по технологии института ВостНИИ «Огнеупор».

В качестве шихтовых материалов применяли железо прямого восстановления 008ЖР, феррохром, никель листовой, ферросилиций, ферромарганец, ферротитан и возврат собственного производства.

Предварительно раскисляли сталь ферромарганцем, ферросилицием и алюминием из расчета 0,05 % от массы металла в печи. Окончательно раскисляли расплав перед выпуском из печи лигатурой ФС30РЗМ30.

Модели детали и литниковой системы из состава МВС-3А запрессовывали на шприц-машине в алюминиевые тонкостенные пресс-формы, а затем методом пайки собирали в модельные блоки (МБ). МБ перед нанесением первого слоя огнеупорного покрытия обрабатывали в водном растворе ПАВ, приведенном в турбулентно-вихревое состояние двумя параллельными струями сжатого воздуха посредством труб, сваренных около днища бака из нержавеющей стали.

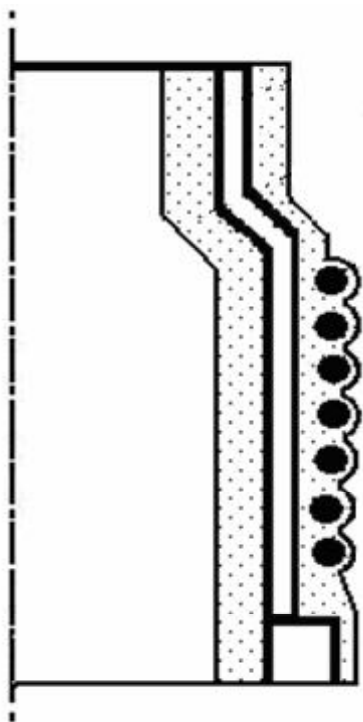


Рис. 1. Схема формирования поперечных ребер жесткости на протяженной плоской поверхности керамической формы цилиндрической части отливки

Огнеупорную суспензию готовили на основе этилсиликата-40 и огнеупорного наполнителя ди-стенсиллиманита. Содержание SiO_2 в ГРЭТС 18–20 %.

Для обсыпки применяли электрокорунд зернистостью 16 или 20 для первых двух слоев и зернистостью 50 или 63 для последующих. Всего наносили семь слоев огнеупорного покрытия (ОП).

К КФ для ЛВМКД предъявляются повышенные требования к их гидравлической прочности [2]. КФ представляет собой конструкцию, образованную слоями ОП вокруг МБ, поэтому в отливках с протяженными тонкими стенками рекомендуется выполнять отверстия или ребра для исключения деформации и прорыва форм жидким металлом [3].

В настоящей работе предложен способ конструктивного упрочнения КФ путем создания жесткой ребристой поверхности на ее внешней стороне без изменения конфигурации детали (рис. 1).

После нанесения трех слоев ОП на внешнюю поверхность большего цилиндра детали наклеивали асбестовый жгут $\varnothing 5$ мм с шагом 10–15 мм, после чего наносили четвертый слой ОП. В результате на внешней поверхности КФ были образованы ребра жесткости. Таким образом, без изменения конструкции детали достигнуто повышение гидравлической прочности керамических форм, что подтвердилось при их заливке под давлением.

Керамические формы после нанесения каждого слоя ОП сушили в вакуумно-аммиачных камерах. Модельный состав из КФ выплавляли в расплаве МВС-3А при температуре 120–130 °С. После выплавления прокаливали в электропечах сопротивления при температуре 950 °С в течение двух часов.

После охлаждения до комнатной температуры КФ заформовывали в контейнеры для литья, одновременно облицовывали металлоприемники жидкостекольной смесью. Контейнеры и металлоприемники перед заливкой нагревали в электропечах с выкатным подом до температуры 500 °С.

Контейнеры с КФ подавали на установку ЛВМКД с помощью тележек, закрепляли их на верхнем столе, а на нижний стол устанавливали металлоприемник. Жидкий металл из плавильной печи выпускали при температуре 1600 °С в чайниковый ковш, нагретый в прокалочной печи до температуры 900 °С. Замеряли температуру стали в печи платино-платинородиевой термопарой ПР

30/6 с записью на диске модернизированного прибора КСП-3 с увеличенной скоростью его вращения, 1 об. за 22 мин.

После перелива металла из плавильной печи в металлоприемник его температура составляет 1470 ± 10 °С. Производят включение гидроцилиндра прессования и заполняют КФ под давлением, с последующей выдержкой в течение 1,5 мин, после чего гидроцилиндр автоматически возвращается в исходное положение и происходит отрыв пресс-остатка от стояка. Форма вместе с металлоприемником на тележке снимается с установки ЛВМКД, а на их место подаются новые, и процесс повторяется.

После выбивки КФ из контейнера, отбивают керамику и отрезают литниковую систему, производят пескоструйную очистку металлическим песком и передают отливки на рентгенконтроль и люмконтроль.

Термообработку прилитых образцов производят совместно с деталями по режиму — нагрев до 1100 °С, 1 ч — охлаждение в воде.

После предварительной механической обработки детали производят повторно рентгенконтроль и люмконтроль и вместе с результатами химического анализа и испытаний механических свойств передают заказчику.

Методика разработки технологического процесса изготовления детали методом ЛВМКД включает: проектирование литниковой системы и модельного блока; расчет размеров металлоприемника, стояка и контейнера; расчет температурного поля в металлоприемнике; анализ направленности затвердевания отливки; корректировка сечения питателей и элементов литниковой системы по результатам компьютерного моделирования.

При проектировании литниковой системы исходили из учета конфигурации детали, течения расплава в полости формы при заполнении ее снизу под напором давления на расплав в металлоприемнике сплошным потоком и направленности затвердевания отливки сверху вниз [4].

Давление на расплав в металлоприемнике в процессе ЛВМКД пропорционально давлению рабочей жидкости в гидроцилиндре прессования. В начале процесса оно равно давлению при холостом ходе, а после заполнения формы давлению, задаваемому при кристаллизации отливки.

Скорость подъема стола при холостом ходе гидроцилиндра прессования в процессе заполнения формы падает до нулевого значения в конце заполнения формы. Средняя скорость движения металла в стояке $v_{ст}$ будет пропорциональна средней скорости подъема стола при холостом ходе v_{xx} и составит:

$$v_{ст} = \frac{v_{xx} D^2}{2d^2}, \quad (1)$$

где D — диаметр металлоприемника; d — диаметр стояка.

Диаметр металлоприемника 220 мм и диаметр стояка 40 мм приняты одинаковыми для отливок всей номенклатуры. Скорость подъема стола при холостом ходе определяется экспериментально в зависимости от давления рабочей жидкости под поршнем гидроцилиндра прессования $p_{кр}$, задаваемого при кристаллизации (табл. 1).

Литниковая система для осуществления процесса ЛВМКД состоит из стояка, коллектора и питателей. Питатели конструктивно выполняют в пресс-форме. Коллектор расположен горизонтально и перпендикулярно стояку. Он предназначен для монтажа на нем модели, равномерного распределения потока металла

на входе в полость формы, удержания неметаллических включений и питания отливки.

Таблица 1

Экспериментальные значения величины скорости подъема стола

$p_{кд'}$, МПа	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$p_{кх'}$, МПа	2,8	2,2	2,2	2,1	2,1
$v_{кх'}$, м/с	0,035	0,028	0,028	0,022	0,022

При проектировании МБ узлы питания отливки располагают в направлении коллектора.

Коллектор в зависимости от конфигурации детали конструктивно выполняют в виде бруска, плиты, диска или исходящих от стояка четырех-шести брусков, расположенных симметрично относительно друг друга (лучевая литниковая система).

Для детали «корпус» спроектирована шестилучевая литниковая система, к которой при сборке МБ припаивают модели образцов для испытаний.

Шесть питателей расположены напротив наиболее массивных узлов корпуса и обеспечивают их направленное затвердевание. Толщина питателей принята в 1,5 раза больше толщины узла питания отливки.

После проектирования литниковой системы определяют размеры металлоприемника и высоту стояка. На рис. 2 показана расчетная схема проектирования литниковой системы и металлоприемника.

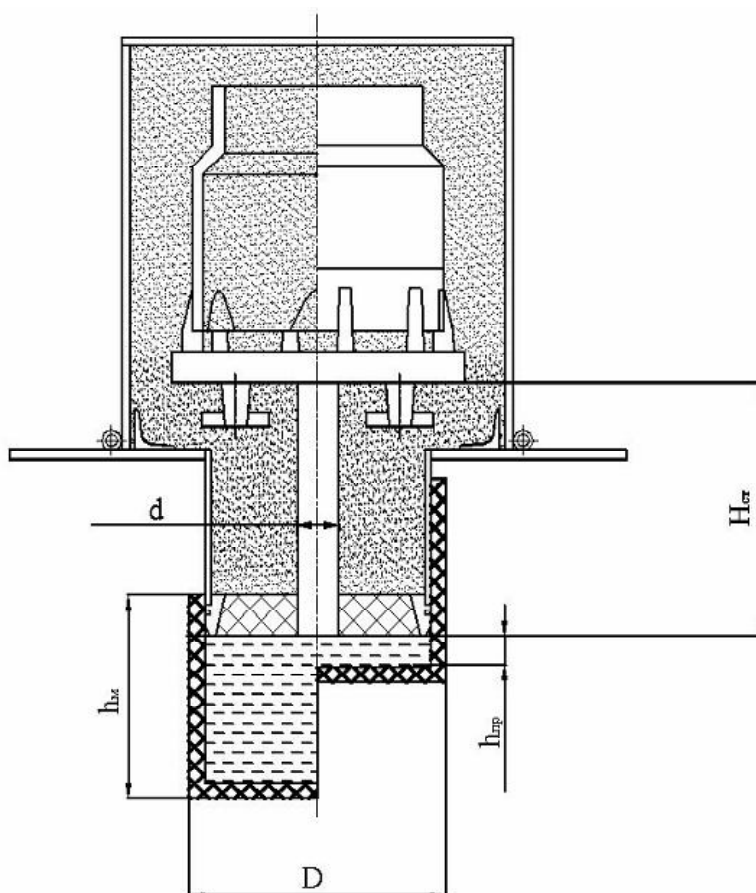


Рис. 2. Расчетная схема проектирования литниковой системы и металлоприемника

Общая высота металлоприемника h_m равна:

$$h_m = h_3 + h_{пр} + \frac{4(V_{отл} + V_{лс})}{\pi D^2} + \frac{\pi d^2 H_{ст}}{4}, \quad (2)$$

где $h_3 = 40$ мм — высота заходной части металлоприемника; $h_{пр} = 30$ мм — высота пресс-остатка; $V_{отл}$ — объем отливки, мм³; $V_{лс}$ — объем литниковой системы, мм³.

Высота стояка равна:

$$H = h + h_k, \quad (3)$$

где h_k — расстояние от коллектора до дна контейнера.

После подстановки значения высоты стояка из формулы (3) в формулу (2) определяют высоту металлоприемника, а затем высоту стояка.

Размеры контейнера принимают с учетом обеспечения между его стенками и МБ зазора, равного 40 мм.

После этого выдают задание на проектирование пресс-формы отливки и литниковой системы, металлоприемника и контейнера.

Применительно к процессу ЛВМКД разработали методику моделирования процессов охлаждения расплава в металлоприемнике, заполнения КФ и затвердевания отливки.

Методика распределения температуры расплава по сечению металлоприемника для начальной температуры на входе в форму 1470 °С приведена на рис. 3, а результаты сведены в табл. 2.

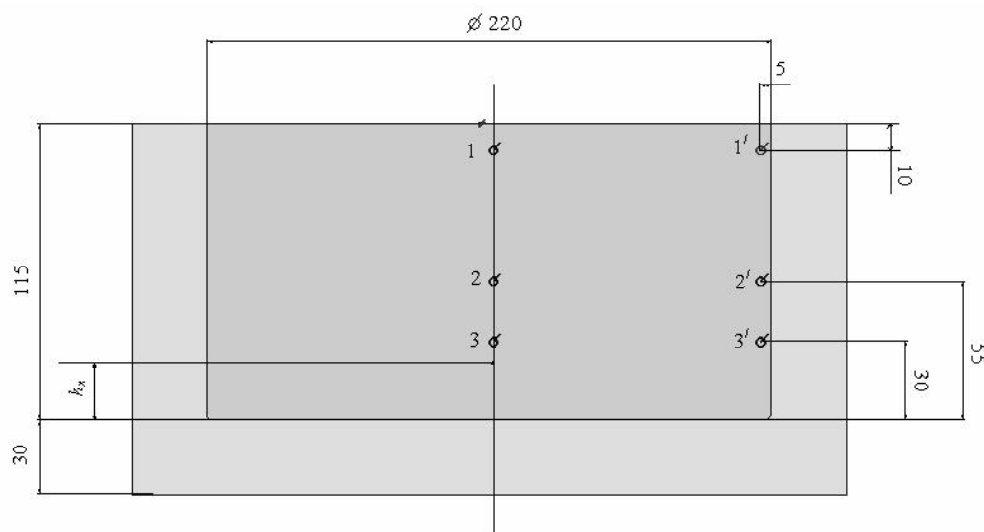


Рис. 3. Размещение контрольных точек в металлоприемнике

Таблица 2

Распределение температуры по сечению металлоприемника при начальной температуре расплава 1470 °С

Контрольная точка/время	Температура, °С				
	33 с	61 с	95 с	125 с	186 с
1	1470,00	1470,00	1469,95	1469,80	1468,93
2	1469,94	1469,45	1468,39	1467,23	1464,58
3	1467,81	1464,79	1462,09	1460,28	1457,44
1'	1441,61	1435,53	1431,18	1427,20	1424,73
2'	1439,68	1434,06	1429,46	1426,77	1423,85
3'	1437,18	1432,74	1427,48	1424,04	1417,80

Изменение температуры расплава в любой точке можно представить в виде графика. Пример графического представления охлаждения расплава в металлоприемнике при начальной температуре стали в точке 1, равной 1470 °С, приведен на рис. 4.

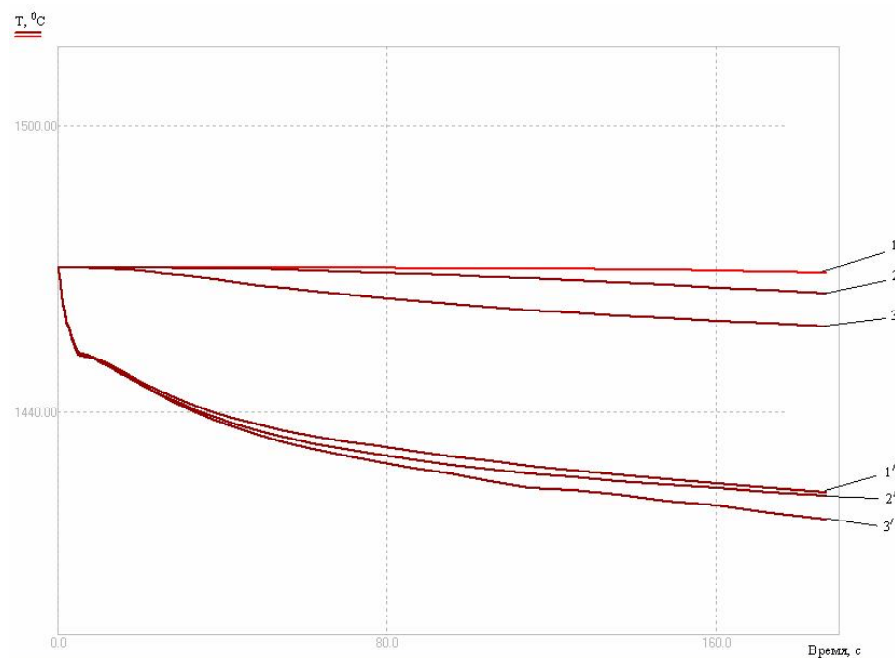


Рис. 4. Изменение температуры стали по сечению металлоприемника в контрольных точках при начальной температуре расплава 1470 °С

Методика моделирования направленного затвердевания отливки представлена на рис. 5 при начальной температуре формы 550 °С и температуре расплава на входе в форму 1470 °С.

В табл. 3 показана температура стали в характерных точках отливки при начальной температуре расплава на входе в форму 1470 °С.

По результатам моделирования определяется продолжительность затвердевания отливки, которая составляет 68 с.

Продолжительность выдержки отливки под давлением приняли равной 1,5 мин, т. е. больше продолжительности ее затвердевания.

По результатам моделирования определили толщину слоя затвердевшей стали от дна металлоприемника в момент затвердевания отливки, которая равна 12,69 мм. Поэтому минимальную величину пресс-остатка приняли равной 30 мм.

Таблица 3

Температура стали в характерных точках КФ при начальной температуре расплава 1470 °С

Контрольная точка	Температура после 30 с от начала заливки, °С	Температура после 68 с от начала заливки, °С
1	1446,06	1299,24
2	1428,98	1287,40
3	1309,37	1155,35
4	1308,28	1128,37
5	1240,89	1045,27

Температура металла перед выпуском из печи $t_{\text{вып}}$ принимается по данным компьютерного моделирования на основе оптимизации температуры расплава на входе в форму, т. е. в точке 0:

$$t_{\text{вып}} = t_{\text{вх}} + \Delta t, \quad (4)$$

где Δt — потери температуры металла при переливе его из печи в ковш, а затем в металлоприемник.

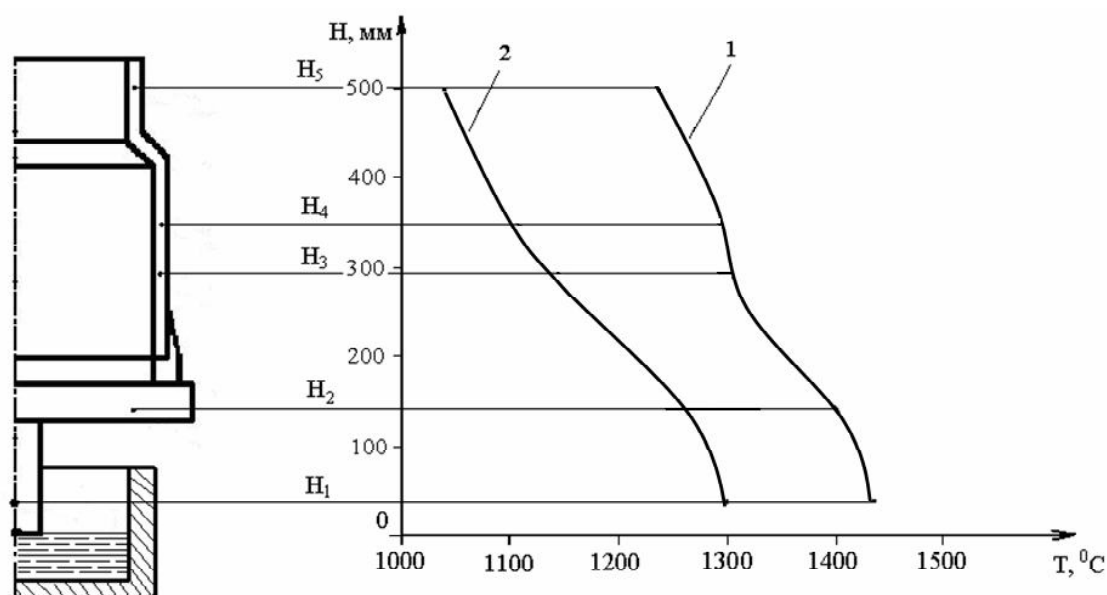


Рис. 5. Изменение температуры стали в зависимости от высоты в характерных точках отливки при начальной температуре расплава 1470 °С:

1 — через 30 с после начала заливки; 2 — через 60 с в момент затвердевания отливки

Опытные работы показали эффективность применения системы компьютерного моделирования LVMFlow для установления гидродинамических режимов, уточнения величины пресс-остатка, сечения питателей и определения температурных параметров процесса ЛВМКД.

Характеристика отливки, параметры и режимы процесса ЛВМКД, по которым произведено изготовление опытной партии корпусов, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика отливки, параметры и режимы процесса ЛВМКД

Наименование	Значение
Масса модели, кг	4,4
Масса модели литниковой системы, кг	0,86
Масса модельного блока, кг	5,26
Температура запрессовки модельного состава в пресс-форму, °С	56–58
Температура выплавления модельного состава, °С	120–130
Масса керамической формы, кг	15,4
Температура прокали КФ, °С	950–980
Температура выпуска металла из печи, °С: для стали 12Х18Н9ТЛ	1600–1610
для стали 10Х18Н11БЛ	1590–1600
Температура нагрева контейнеров, металлоприемников и пуансонов после облицовки жидкостекольной смесью, °С	300–500
Давление рабочей жидкости под поршнем гидроцилиндра при кристаллизации отливки, МПа	3,5–4,0
Величина пресс-остатка, мм	40–50
Продолжительность заливки, с	7–8
Выдержка кристаллизующегося расплава под давлением, с	90
Температура нагрева ковша, °С	800–900
Линейная усадка сталей в процессе осуществления ЛВМКД, %	1,8–2,0

Отливки ЛВМКД отличаются от ЛВМ отсутствием характерного для сталей 12Х18Н9ТЛ и 10Х18Н11БЛ дефекта поверхности «питтинга» и повышенным

уровнем механических свойств образцов из стали 12Х18Н9ТЛ и плотности. Плотность образцов из стали 12Х18Н9ТЛ одинакового химического состава, залитых из одной плавки методом ЛВМ, составляет 7800 кг/м^3 , а ЛВМКД — 8100 кг/м^3 .

Результаты испытаний механических свойств образцов из стали 12Х18Н9ТЛ, полученных методом ЛВМКД, и их сравнение проиллюстрированы на рис. 6, а из стали 10Х18Н11БЛ — на рис. 7.

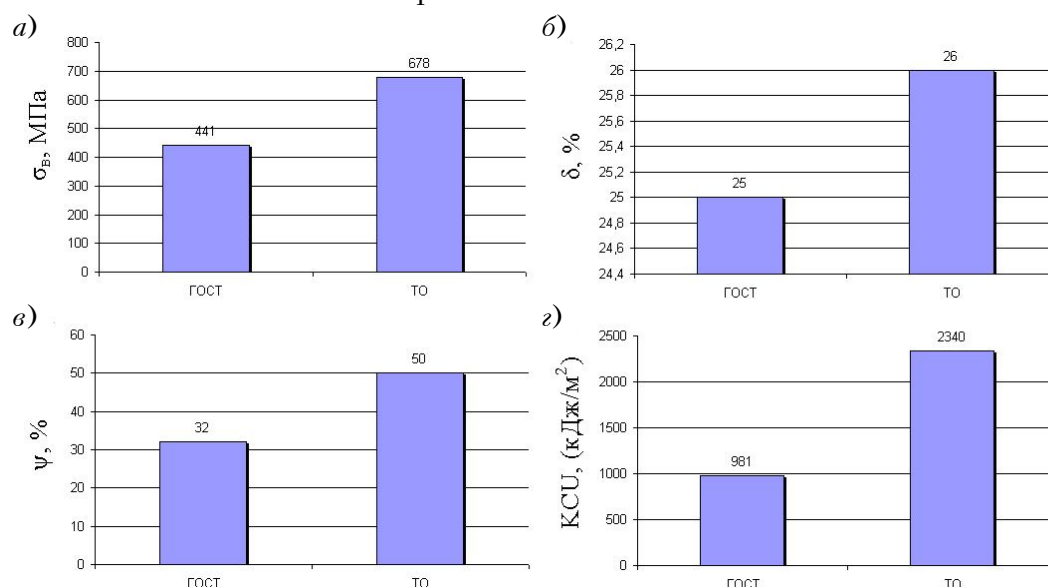


Рис. 6. Сравнение значений механических свойств образцов из стали 12Х18Н9ТЛ: а — предел кратковременной прочности; б — относительное удлинение; в — относительное сужение; г — ударная вязкость; ГОСТ — значение в соответствии с ГОСТ 977-88; ТО — термообработанные, полученные методом ЛВМКД

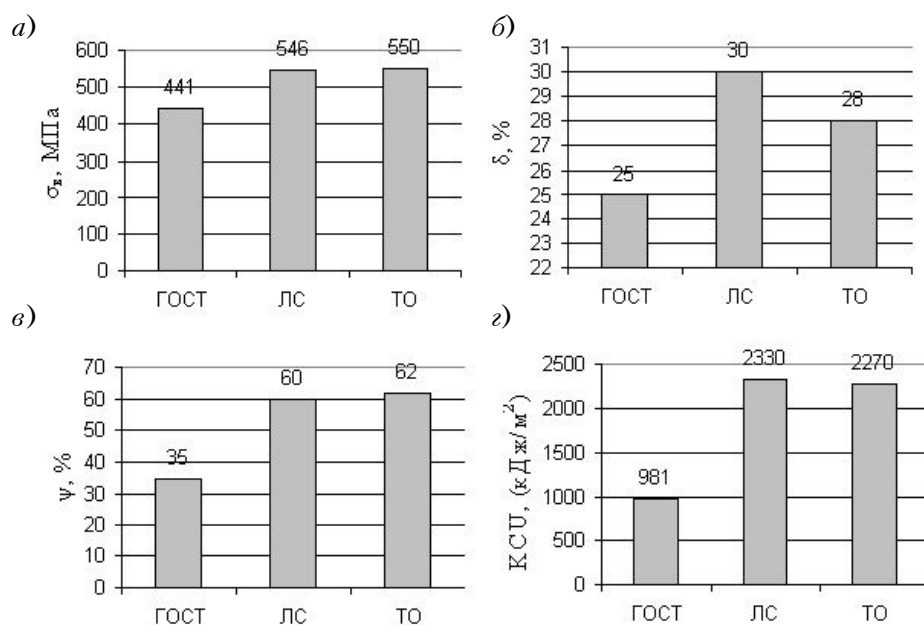


Рис. 7. Сравнение значений механических свойств образцов из стали 10Х18Н11БЛ: а — предел кратковременной прочности; б — относительное удлинение; в — относительное сужение; г — ударная вязкость; ГОСТ — значение в соответствии с ГОСТ 977-88; ЛС — в литом состоянии, полученные методом ЛВМКД; ТО — термообработанные, полученные методом ЛВМКД

Отливки из сталей 12Х18Н9ТЛ и 10Х18Н11БЛ соответствуют требованиям нормативной документации на поковки и сварно-штампованные узлы для энергомашиностроения, а себестоимость серийного изготовления одной литой детали «корпус» в два раза ниже штампованного варианта.

Результаты проведенной работы показали, что ЛВМКД относится к перспективным технологическим процессам в производстве тонкостенных изделий сложной конфигурации с повышенными требованиями к качеству литья из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса.

Литература

1. *Способ* литья по выплавляемым моделям с кристаллизацией под давлением / В.И. Томилов, Н.М. Чернов, Ю.А. Караник, В.Н. Гречко. Патент РФ № 2048954 27.11.95. Бюл. № 33.
2. *Чернов Н.М., Гречко В.Н.* Исследование гидравлической прочности оболочковых форм // *Литейное производство*. 1995. № 6. С. 24–25.
3. *Литье* по выплавляемым моделям / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман и др.; Под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
4. *Чернов Н.М., Игнатов А.И., Гречко В.Н.* Литье алюминиевых заготовок по выплавляемым моделям с кристаллизацией под давлением // *Литейное производство*. 1995. № 2. С. 12–13.