

УДК 621.746.553+621.746.554+519.876.5

**А. В. Дудченко, Н. И. Тарасевич\*, И. Н. Примак\*,  
В. М. Щеглов\***

ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОДВОДА МЕТАЛЛА В ФОРМУ ДЛЯ УСЛОВИЙ СКОРОСТНОЙ ЗАЛИВКИ**

*На базе анализа теплофизических процессов, сопровождающих заполнение формы при различных типах литниковых систем, даны рекомендации по выбору рациональных параметров скоростной заливки для трех вариантов подвода металла (литниковая система с прямым и обратным стояками, сифонная заливка).*

**Ключевые слова:** прямой стояк, обратный стояк, сифонный подвод металла, литье, крупные отливки, математическое моделирование, гидродинамика.

*На базі аналізу теплофізичних процесів, які супроводжують заповнення форми при різних типах ливникових систем, дані пропозиції по вибору раціональних параметрів швидкісної заливки для трьох варіантів підводу металу (ливникова система з прямим та оберненим стояками, сифонна заливка).*

**Ключові слова:** прямий стояк, обернений стояк, сифонний підвід металу, литво, крупні відливки, математичне моделювання, гідродинаміка.

*On the basis of analysis of thermal physic processes which attend filling mould by various types of gating systems, this article advice to extract rational parameters of high-speed casting for three types metal feed (the gating system with straightforward and backward risers, the bottom casting).*

**Keywords:** straightforward riser, backward riser, bottom feed of metal, casting, huge cast, mathematical simulation, hydrodynamics.

**Т**ехнология скоростной заливки находит широкое применение при получении крупного стального литья. Качество литейной продукции во многом определяется условиями заполнения формы. Получение высокотоннажных стальных отливок зачастую сопровождается скоростями заливки 35 т и более в минуту. Этот фактор является определяющим для формирования гидродинамических процессов, сопровождающих заполнение формы жидким металлом, и формирования самой отливки.

В отечественной литературе информация об исследованиях скоростной заливки крупного стального литья носит отрывочный характер. За рубежом эти данные классифицируются как «Know-how» и широкой огласке не предаются. За последние годы к наиболее значимой работе в этой области можно отнести монографию В. В. Назаратина [1], в которой системно рассмотрены проблемы изготовления крупного стального литья ответственного назначения. При этом вопросы исследования гидродинамических особенностей скоростной заливки, распределения потоков и теплофизических параметров скоростного заполнения форм остаются малоизученными.

При освоении технологического процесса изготовления литья с применением холоднотвердеющих смесей (ХТС) на ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (НКМЗ) проведен комплекс исследований, направленных на выявление гидродинамических особенностей работы литниковых систем (ЛС) различных конструкций и выбор оптимальной схемы заливки для условий скоростного заполнения форм. Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием программного пакета MagmaSoft 4.4.

В качестве объекта исследования выбрали отливку «типа ПЛИТА» размерами 1500×180×2000 мм. Рассмотрели три типа литниковых систем при заливке формы: этажная ЛС с прямым стояком; этажная ЛС с обратным стояком; ЛС с сифонным подводом металла.

Компьютерное моделирование проводили для сравнения условий заполнения формы и затвердевания отливки при использовании указанных выше ЛС и изменении скорости заливки. С этой целью время заполнения формы в вычислительных экспериментах было принято 30, 60, 90 и 120 с.

Гидродинамику жидкого металла оценивали по изменению во времени поля скоростей жидкого металла, а процессы охлаждения и затвердевания – по изменению температурного поля отливки. Наглядность была обеспечена за счет использования цветовых шкал.

В схеме эксперимента принято, что наполнительный и облицовочный слои смеси опытной отливки изготовлены из холоднотвердеющей смеси по «Фуран-процессу».

### Величина расхода металла при заливке

Время заливки $\tau$ , с	Скорость заливки формы	
	кг/с	мм/с
120	59	28
90	79	37
60	118	55
30	237	109

Схема отливки и соответствующей литниковой системы вместе с размещением виртуальных датчиков, которые были использованы при моделировании, представлена на рис. 1.

Соответствие, продолжительности заполнения формы массовой скорости разливки и линейной скорости подъема металла в форме представлены в таблице.

*Способ заливки металла через прямой стояк*

Изучение данных, полученных в результате моделирования работы этого типа ЛС, показывает, что ей присущ ряд характерных особенностей. На рис. 2 представлена гидродинамика жидкого металла при заполнении формы на 10, 30, 60 и 100 % при различной скорости заливки. При заливке в течение 120 с скорость заполнения формы небольшая, 10 % объема заполнено за счет поступления металла из нижнего питателя. У противоположной стенки из-за погашения линейной скорости металла имеет место повышение мениска металла относительно его зеркала со стороны стояка. Увеличение скорости заливки приводит к возрастанию скорости ударной волны у противоположной стенки. Свободная поверхность металла приобретает параболическую форму. Снижение времени заливки ниже 90 с приводит к тому, что металл поступает в форму (включая начальную стадию заливки) через нижний и средний питатели.

# Гидродинамика процессов литья

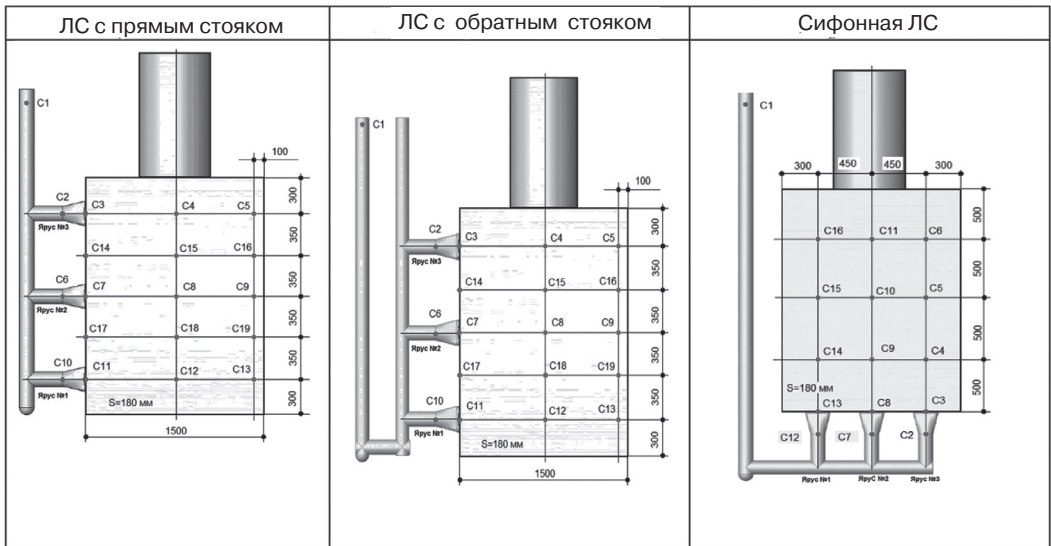


Рис. 1. Схема расположения виртуальных датчиков при моделировании заполнения формы

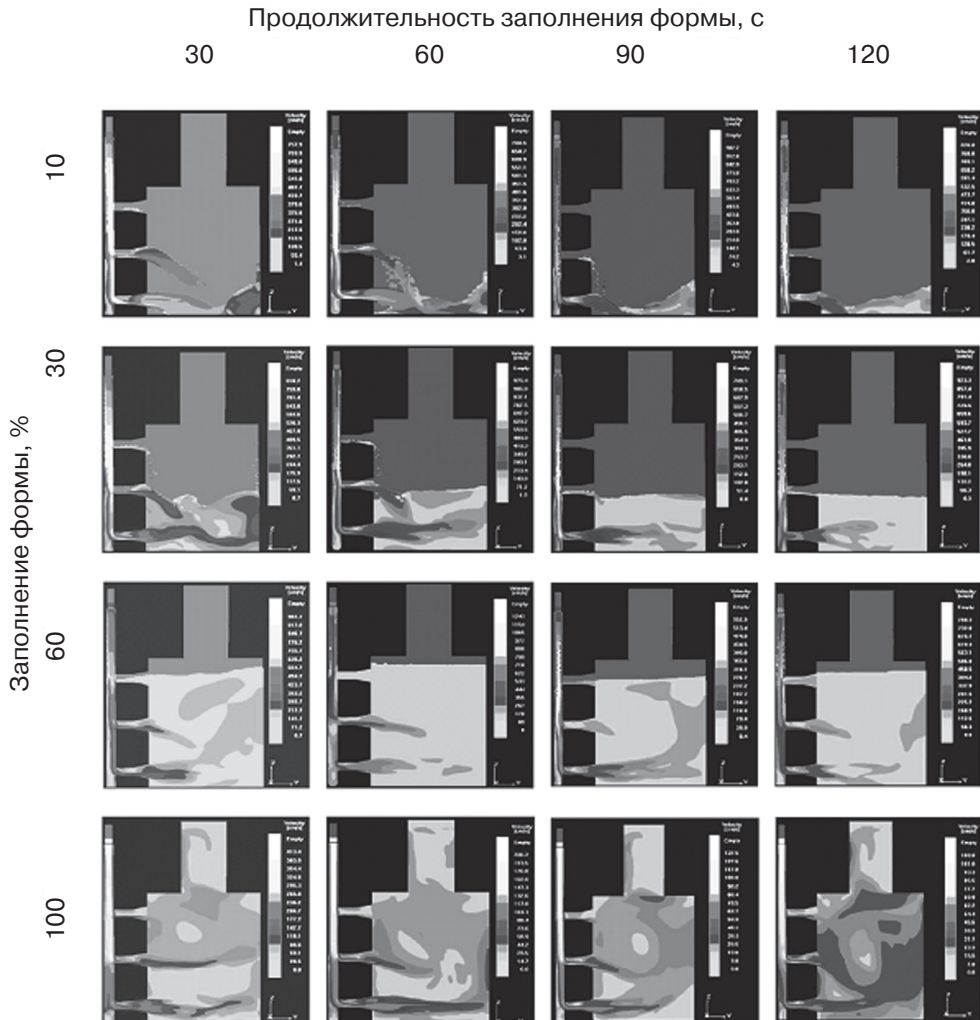


Рис. 2. Поле скоростей при разном уровне заполнения формы через прямой стояк

В пристеночной области наблюдается повышение скорости, свободная поверхность металла приобретает волнообразный характер, чему способствуют как обратная волна, так и струя металла, истекающего из среднего питателя. Налицо повышение турбулентности жидкого металла при сокращении времени заливки. Анализ полей скоростей показывает, что заполнение формы происходит за счет поступления металла из нижнего и среднего питателей.

Следует отметить: преждевременное включение и постепенное увеличение интенсивности работы питателя второго яруса по мере увеличения скорости заливки; наличие инъекции металла через питатели вышестоящих ярусов и высокую динамику струи металла, истекающего из питателя нижнего яруса; непрекращающуюся интенсивную работу питателя нижнего яруса в течение всего периода заливки.

Указанные явления относятся к разряду отрицательных, так как их следствием могут стать разрывы формы или стержней, захват потоком металла воздуха и различного рода неметаллических включений, а также создание неблагоприятных тепловых условий для затвердевания отливки [2, 3].

Анализ изменения траекторий пробных частиц показал (рис. 3), что при движении металла в форме и ЛС для указанной схемы заливки характерна наибольшая длина

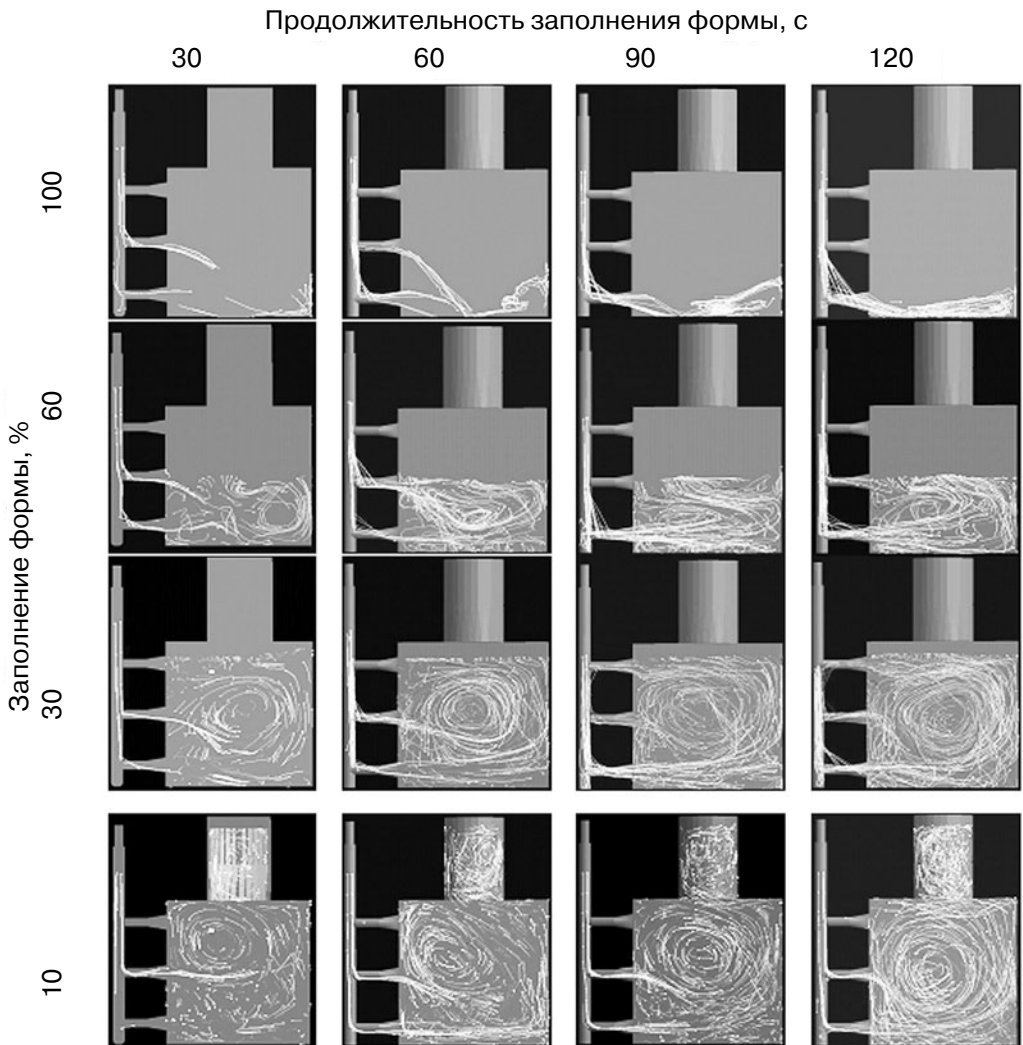


Рис. 3. Поле траекторий перемещения пробных частиц при разном уровне заполнения формы через прямой стояк

пути пробега элементарных объемов металла, поступающего в форму. Металл, многократно перетекая из формы в ЛС и обратно, во-первых, снижает пропускную способность самой ЛС, во-вторых, подвергается возможности вторичного окисления и насыщения газами.

Начиная с момента достижения поднимающимся металлом уровня питателя 3-го яруса и до превышения этого уровня, происходит интенсивный захват металла из области свободной поверхности (с «зеркала» металла). Затем этот металл распределяется по всему объему отливки с локализацией значительной его части в центральной зоне вращательно движущихся потоков. По мере увеличения скорости заливки количество металла, повторно поступающего в ЛС из формы, снижается. Это вызвано повышением степени наполненности ЛС. Усиление динамики потоков металла в полости литейной формы при повышении скорости заливки значительно увеличивает и свободную поверхность металла.

В проведенных исследованиях питатель 3-го яруса при всех ЛС для рассматриваемых скоростей заливки не работает. При подъеме уровня металла в форме до отметки этого питателя поток металла в ЛС начинает интенсивно инжектировать металл из формы со скоростью перекачки до 0,7-0,9 м/с. С увеличением скорости заливки скорость инъекции металла питателем 3-го яруса несколько снижается. Общая продолжительность работы питателя верхнего яруса перед окончанием заполнения формы не превышает нескольких секунд. Порция металла, поступившая за этот отрезок времени, увлекается вращательным движением и попадает не в прибыльную часть отливки, а в ее центр. По мере формирования области вращательно движущегося потока металл из питателей 2 и 3 -го ярусов ЛС поступает под эту область. Двигаясь таким образом, металл опускается до уровня 1-го яруса и лишь потом поднимается в верхнюю часть отливки.

Питатель 2-го яруса при заливке за 60 и 30 с начинает свою работу через 3 и 2 с от начала заливки, соответственно. Вследствие гидравлического удара в ЛС значительное количество металла выбрасывается питателем сразу же после его включения. До достижения металлом в форме соответствующего уровня канал питателя остается заполненным на величину от 30 до 50 %. Питатель 2-го яруса при более медленной заливке за 90 и 120 с начинает функционировать с подъемом металла до его отметки.

В процессе заполнения формы в центральной части отливки образуется мощное вихревое течение. Скорость металла и его температура в центре завихрения ниже, чем в остальных частях отливки (разница температур в различные периоды заливки составляет около 10 °С). В центре области вращательно движущегося металла существует зона пониженного давления с высоким потенциалом захвата неметаллических включений. Металл, поступающий из питателей 2-го и (перед самым окончанием процесса заливки) 3-го ярусов, попадает не в верхнюю часть отливки, а вниз под вихревую зону.

Вырождение поступательно движущегося потока металла из питателя (канального течения) до условно принятой величины 0,2 м/с происходит с разной степенью интенсивности. Для случаев более быстрого заполнения отливки при 30 и 60 с, когда энергии потока из второго питателя достаточно для преодоления вихревой зоны, расстояние затухания нестабильно и составляет 1400-750 мм. Поток металла из питателя 1-го яруса смещается в область более низкого давления – к вихревой области, и при всех исследуемых массовых скоростях заливки достигает противоположной стенки отливки, оказывая на нее определенное воздействие. В условиях данного эксперимента интенсивность разрушения поверхности формы не определялась. Но можно предположить, что металл будет оказывать наибольшее эрозионное воздействие на формовочную смесь на стенке формы, противоположной питателям, в области между первым и вторым питателями. В районе подвижной зоны вихреобразования в центральной части отливки наблюдается наибольшая скорость движения потока металла.

## Гидродинамика процессов литья

Анализ процессов кристаллизации металла (рис. 4) опытной отливки для рассматриваемого типа ЛС показывает аналогичные изменения температурного поля при четырех скоростях заливки.

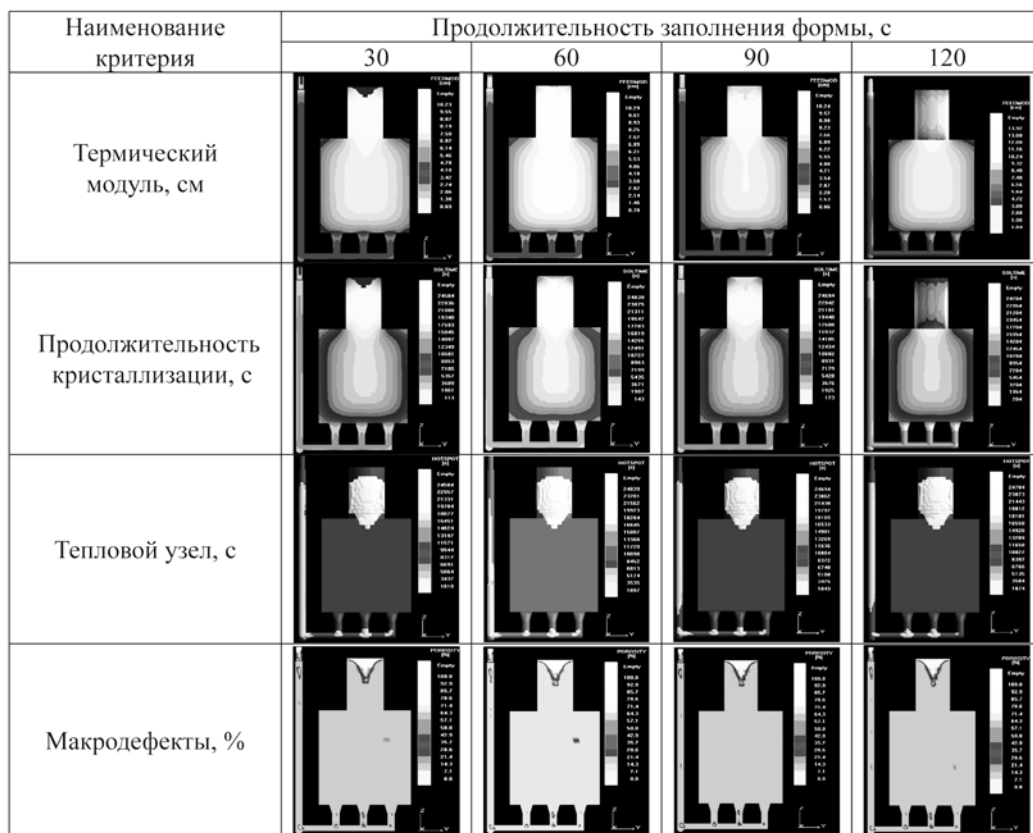


Рис. 4. Оценка качественных параметров формирования отливки при заполнении формы через прямой стояк

Анализ прогнозируемых макродефектов позволяет сделать следующие выводы: возникновение усадочных раковин (для отливки данной конфигурации) в полной мере определяется процессами течения металла в форме и скоростью заливки; объем усадочных дефектов по отношению к общему объему отливки существенно возрастает при снижении скорости заливки формы во всех четырех случаях заливки; дефекты располагаются вне области вращательного движения потоков металла; при скорости заливки 30 и 60 с прогнозируемые дефекты формируются в области застойных зон отливки. При скорости заливки 90 и 120 с дефекты более многочисленные и позволяют косвенно определить места наибольшего разогрева формы при ее заполнении.

Поступление металла из питателя второго яруса в нижнюю часть формы способствует повышению температуры нижней части отливки. Такая ситуация может привести к образованию газоусадочных дефектов в местах турбулентности.

Преждевременный выброс значительного количества металла питателем 2-го яруса может привести к преждевременной его кристаллизации, что в ряде случаев инициирует полное прекращение работы питателя, увеличивает количество неметаллических и других включений в металле отливки. Согласно полученным экспериментальным данным, указанный тип ЛС вполне приемлем для заполнения формы со скоростью подъема металла не более 10-15 мм/с.

### Способ заливки металла через обратный стояк

Включение в состав ЛС дополнительного технологического элемента – обратного стояка оказывает существенное влияние (в отличие от прямого) на характер гидродинамических процессов, происходящих в форме при заливке. На рис. 5 приведено поле скоростей при заполнении формы на 10, 30, 60 и 100 % для 4-х скоростей заливки.

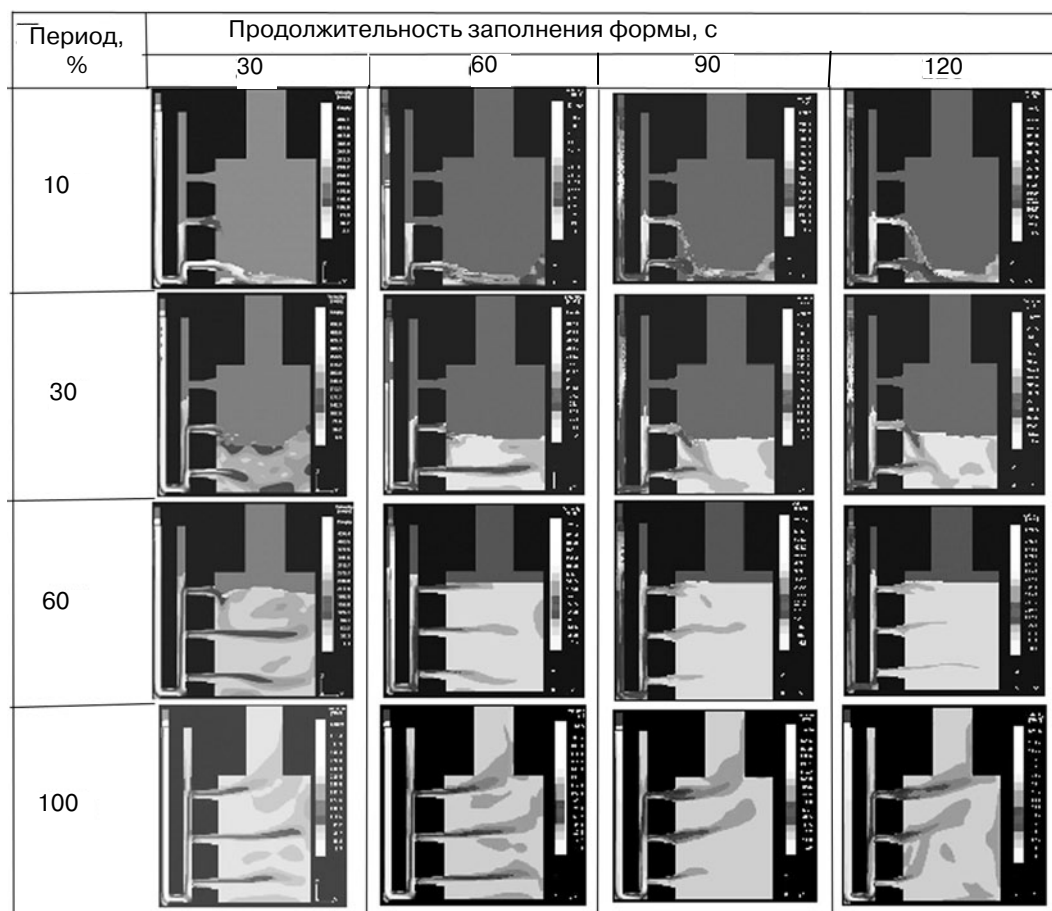


Рис. 5. Поле скоростей при разном уровне заполнения формы через обратный стояк

К числу основных отличительных от предыдущего варианта особенностей данного типа ЛС, выявленных в ходе компьютерного моделирования, необходимо отнести значительное улучшение характеристик движения потока и показателей работы каждого отдельно взятого питателя. Кроме того, при таком подводе металла в форму удовлетворительно работает питатель 3-го яруса литниковой системы, повторный захват металла практически отсутствует. Значительное усложнение претерпевает траектория перемещения потоков металла в форме, существенно изменяясь с течением времени, металл более интенсивно перемешивается. Весьма актуальной остается проблема преждевременного включения питателя 2-го яруса и постепенного увеличения интенсивности выбросов металла с уменьшением времени заливки, что подтверждает ранее полученные данные [2, 3] и др. Указанные явления находятся в определенной зависимости от продолжительности заполнения формы.

При низкой скорости заливки (время заполнения формы – 90 с и более) 10 % объема отливки заполнялось за счет поступления металла из нижнего и среднего питателей. Из-за удара струи поступающего металла о противоположную стенку наблюдали повышение мениска жидкого металла в этой области. Падение струи металла из среднего питателя приводило к возмущению свободной поверхности

с концентрацией высоких скоростей движения металла в турбулентном режиме в зоне нижнего питателя.

Вследствие увеличения скорости заполнения формы заливка 10 % объема отливки происходила преимущественно через нижний питатель. При этом увеличивалась скорость турбулентных потоков со стороны заливки и снижалась скорость ударной струи у противоположной стенки. Свободная поверхность приобретала более сглаженную форму.

Анализ 30 % поля скоростей при заполнении формы жидким металлом показал, что струя металла, поступающего из второго питателя, гасит скорость струи металла, поступающего из нижнего питателя, а это приводит к снижению средней скорости жидкого металла в заливаемом объеме. Увеличение скоростного режима заливки приводит к возрастанию скорости струи жидкого металла, поступающего из нижнего и среднего питателей, и снижению степени их взаимного влияния. Путь затопленной струи приобретает направленный горизонтальный характер. В процессе заполнения формы наблюдали снижение скорости потоков жидкого металла у противоположной стенки формы, что обуславливало снижение отрицательного влияния ударной волны на стенку формы. Подключение верхнего питателя приводило к интенсификации вихревых потоков в области прибыли. При заливке в течение 30 и 60 с можно выделить два периода существования свободной поверхности – в виде параболы (до достижения металлом уровня третьего питателя) и плоскости (в оставшийся период времени). Значительная по величине ударная волна не образуется.

Процесс заполнения формы сопровождается формированием многочисленных крупных и мелких вихревых зон, отличающихся значительной стабильностью существования. Порции металла, находившиеся в различных частях отливки в момент зарождения вихревого движения, остаются внутри этих областей, совершая, в основном, лишь вращательное движение. Так, области вращательно движущегося

металла (вариант заливки формы за 30 и 60 с), остаются практически неподвижными до окончания процесса заполнения формы.

По мере подъема уровня металла в форме возникает явление его циркуляции в пределах отдельно взятого питателя, но без абсолютного снижения пропускной способности питателя, как в случае с прямым стояком.

Металл поступает в отливку через верхнюю часть питателя, а в центральной и нижней его частях происходит образование вихря. Такая ситуация характерна для питателей 1 и 2-го ярусов (кроме варианта заливки за 120 с) и не наблюдается в питателе 3-го яруса – рис. 6.

Для всех случаев заливки через обратный стояк характерно явление «отжима» струи металла, истекающего из питателя к верхней его части. В процессе заливки происходит разделение потока металла, истекающего из каждого питателя. Большая часть металла вовлекается во вращательное движение, поднимаясь в промежуток между рассматриваемым и вышестоящим питателем, а меньшая часть потока (10-20%) опускается вниз, также участвуя во вращательном движении.

Для рассматриваемой схемы заливки практи-

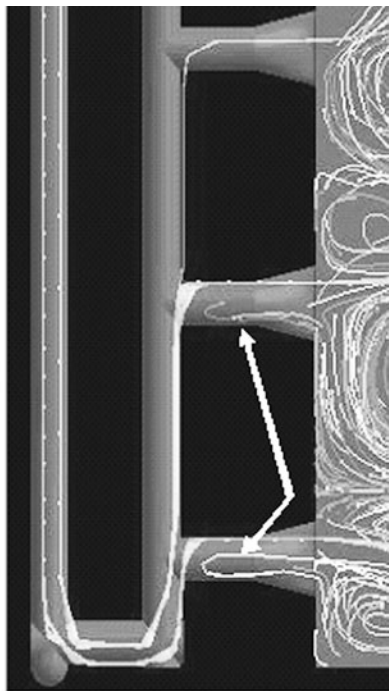


Рис. 6. Циркуляция в 1 и 2-м ярусах питателей и отжим струи металла вверх



чески не наблюдается инжекция металла обратно в ЛС. Зафиксированные случаи поступления металла в обратный стояк из питателя 3-го яруса при заливке за 120 и 90 с весьма незначительные и, в основном, ограничиваются вращательным движением металла в питателе. При более быстрой заливке за 60 и 30 с металл из формы не попадал в ЛС.

Значительная часть металла, находящегося в прибыли, поступала в полость формы на конечных стадиях ее заполнения, рис. 7. Потоки металла при одновременной работе всех питателей имеют восходящий характер по направлению к прибыли. Свободная поверхность металла («зеркало») менее развита, чем при заливке через прямой стояк. Но ее увеличению способствует струя металла, преждевременно истекающая из питателей 2 и 3-го ярусов. С сокращением продолжительности заливки пропорционально растет динамика потоков металла в полости литейной формы, что также способствует развитию свободной поверхности металла.

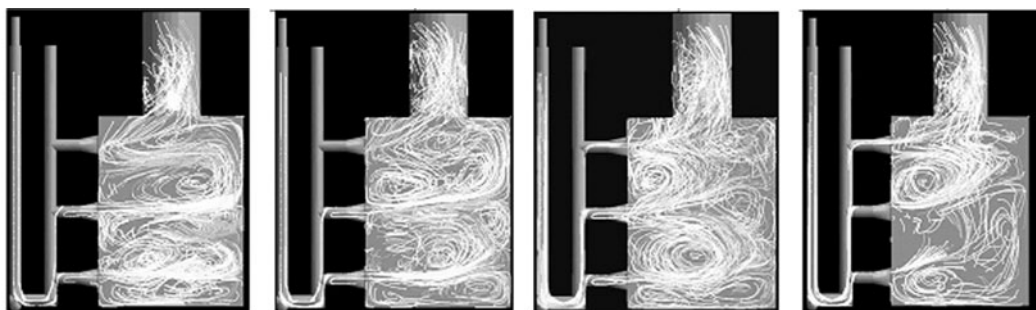


Рис. 7. Поле движения пробных частиц на финальной стадии заполнения формы через обратный стояк

При заливке за 120, 90 и 60 с уровень металла в обратном стояке достигает питателя 2-го яруса в самом начале заливки и мало изменяется до достижения основным металлом этой отметки. Металл выбрасывается из питателя 2-го яруса сразу же после включения первого питателя. Питатель 2-го яруса в отличие от схемы заливки с прямым стояком оказывается полностью заполненным намного раньше момента достижения уровнем металла в форме его отметки. 3-й ярус питателя начинает функционировать практически одновременно с подъемом уровня металла до его высоты, что характерно для всех четырех случаев заливки.

Особенностью ЛС такого типа является ярко выраженное канальное течение потока жидкого металла. С точки зрения затухания скорости движения металла, оптимальным следует считать вариант медленной заливки – за 120 с. При этом потоки металла из питателей вырождаются уже в центральной части отливки. В остальных случаях четкой закономерности между скоростью заливки и расстоянием, на котором происходит затухание потоков металла из питателей, выявить не удалось. В большинстве случаев металл достигает противоположной стенки отливки, имея скорость более 0,2 м/с.

Максимальная и минимальная скорости металла на выходе из питателя для ярусов 1-3 составляют соответственно 0,1/2,8 - 0,2/2,7 - 0,4/1,8 м/с.

Образование вихрей в питателе и литниковом ходе отрицательно влияет на пропускную способность ЛС и снижает ее коэффициент полезного действия, что согласуется с данными работы [4]. Возникает нерациональное использование энергии потока металла, уменьшается площадь живого сечения питателя.

Образование дефектов усадочной природы прогнозируется вне зон вращатель-

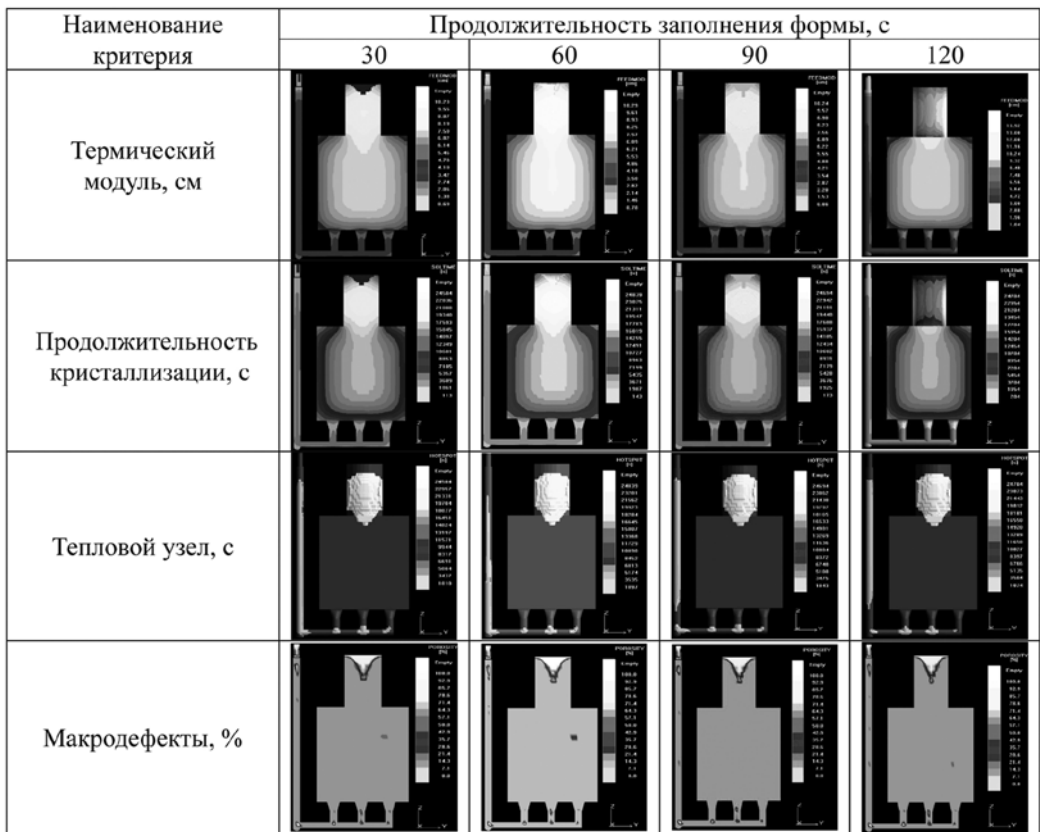


Рис. 8. Оценка качественных параметров формирования отливки при заполнении формы через обратный стояк

ного движения металла, но в непосредственной близости от них. Следует отметить, что при времени заливки более 60 с макродефекты практически отсутствуют, рис. 8.

Таким образом, работу ЛС с обратным стояком следует считать удовлетворительной при длительности заливки не менее 120 с, когда канальное течение металла выражено слабо, и он интенсивно перемешивается по всей высоте отливки. Иными словами, рекомендуемая скорость подъема металла в форме для данного типа ЛС не должна превышать 20 мм/с.

#### *Сифонный подвод металла*

Способ заливки форм с сифонным подводом металла имеет принципиальное отличие от двух описанных выше. В зарубежной практике основная ставка специалистов-литейщиков была сделана именно на такую разновидность заливки. Отметим основные особенности ее работы, обнаруженные в ходе компьютерного моделирования, рис. 9.

Совершенно понятным является определенное положительное воздействие «подушки металла» на процесс заливки и формирование потоков в литейной форме при его истечении под затопленный уровень.

Более интенсивная работа третьего питателя, по сравнению с двумя другими, вызывает увеличение скорости движения потоков металла, что влечет за собой падение давления в этой области. Схема движения потоков металла из второго и первого питателей определяется зоной пониженного давления вблизи канального течения, создаваемого третьим питателем. Образующееся вращательное движение вызывает отклонение потока металла из второго питателя на угол до 5° от вертикальной оси, из третьего питателя – на угол до 80°.

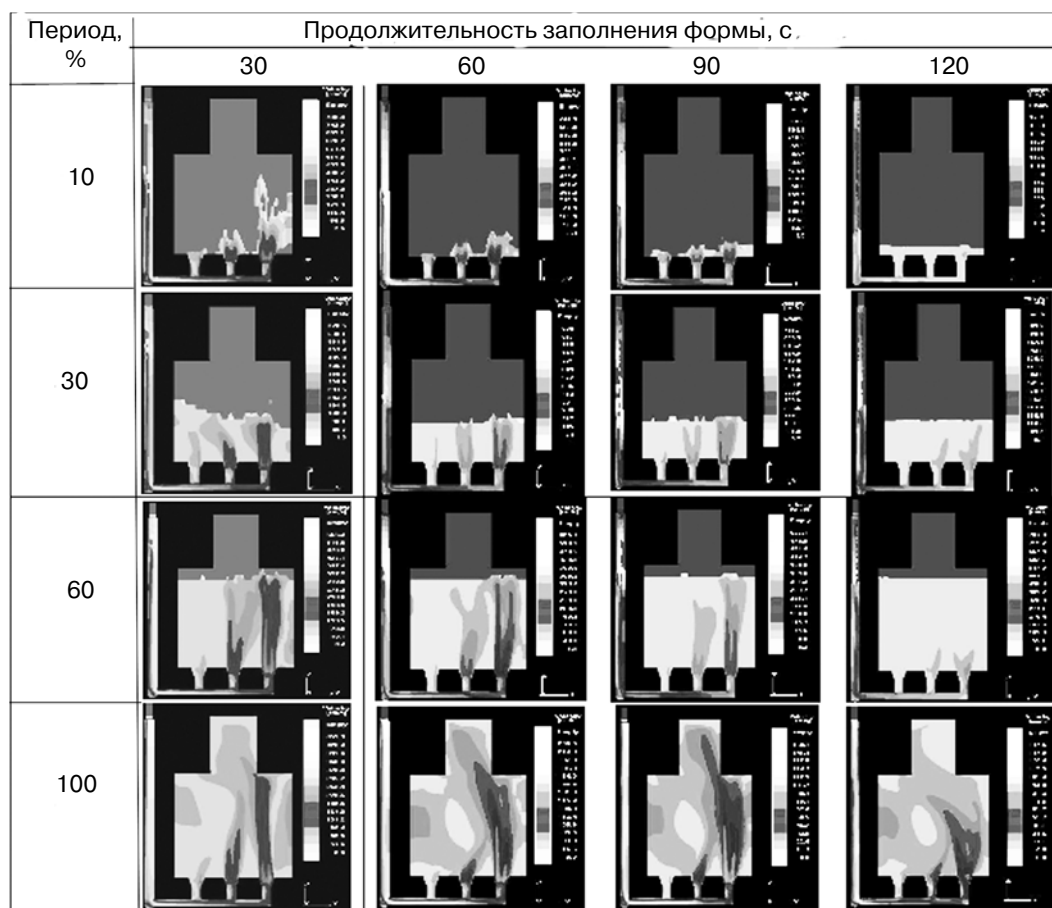


Рис. 9. Поле скоростей при разном уровне заполнения формы сифонным способом

Высота столба металла в форме и общая величина расхода ЛС оказывают взаимно противоположное влияние на функционирование первого питателя. При определенном их сочетании, что характерно, как правило, для второй половины заливки, когда противодавление столба металла в форме становится достаточным, работа питателя становится слабо выраженной или полностью прекращается. При этом необходимо отметить, что процесс инъекции металла обратно в ЛС выражен слабо. По аналогии с предыдущей ЛС, фиксации показателей захвата потока в ЛС вызваны завихрениями, образующимися под воздействием транзитного потока,двигающегося вдоль щели питателя.

Время включения питателей не имеет линейной зависимости от величины расхода металла в ЛС, но последовательность включения всегда сохраняется – от третьего питателя к первому.

Практически во всех вариантах заливки имеет место наличие мощного канального течения, при котором интенсивные потоки металла, истекающие из второго и третьего питателей в вертикальном направлении, обладают достаточной энергией для преодоления зоны вихревого течения (рис. 10). Огибая зону завихрения, которая формируется в левой части отливки, они достигают полости прибыли и тем самым способствуют формированию положительно направленного температурного градиента отливки.

Для быстрой заливки (за 30 с) на начальном периоде заполнения формы характерно образование волны металла, перемещающейся от одной стенки формы к другой. Это возмущение свободной поверхности нивелируется приблизительно через 15 с заливки вертикальными потоками металла, истекающими из питателей. При медленном заполнении формы образования волн не наблюдается.

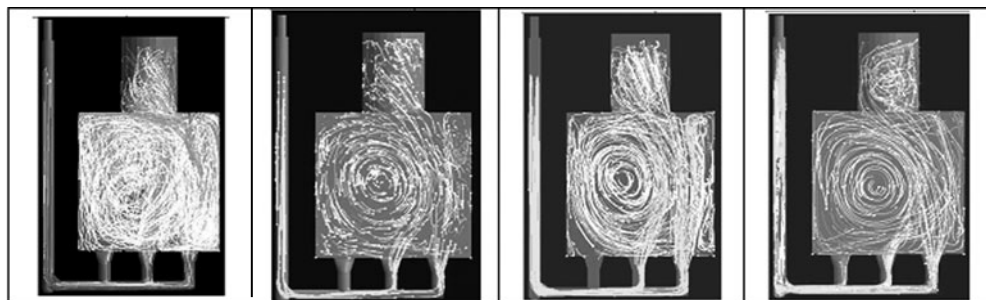


Рис. 10. Поле движения пробных частиц на конечной стадии заполнения формы сифонным способом

Для данного типа ЛС характерно сохранение оптимальных показателей движения потока на протяжении всего периода заливки за 120 и 90 с. Лучшие показатели для вариантов заливки за 60 и 30 с наблюдаются во второй половине этого периода. Несмотря на то, что ЛС удовлетворительно работает, начиная со скорости заливки 55 кг/с (что соответствует заливке за 60 с), вполне закономерным было бы получение неудовлетворительного внутреннего качества реальной отливки. Причиной этого, как указывалось выше, может стать высокая динамика потоков в областях канального течения металла.

Наименование критерия	Продолжительность заполнения формы, с			
	30	60	90	120
Термический модуль, см				
Продолжительность кристаллизации, с				
Тепловой узел, с				
Макродефекты, %				

Рис. 11. Оценка качественных параметров формирования отливки при заполнении формы сифонным подводом металла

Эта схема заполнения формы позволяет стабилизировать форму свободной поверхности металла за счет вертикальных потоков металла из питателей и максимально использовать противодействие силы тяжести, а также получить управляемый режим заливки с заданными параметрами потока.

Картина расположения прогнозируемых дефектов для всех рассматриваемых скоростных режимов заливки является оптимальной (рис. 11). Возможные места образования усадочных раковин расположены в местах с наибольшей динамикой потока. Следовательно, при выравнивании расхода металла для отливки данной конструкции можно полностью исключить дефектные места.

Для ряда конструкций отливок эффективными могут стать технологические решения по созданию «подушки» металла путем заполнения части формы через сифонный подвод с последующей этажной заливкой, так как для отливок определенной номенклатуры в результате использования преимуществ двух типов ЛС возможно получение положительных результатов.

Дальнейшие исследования по усовершенствованию ЛС целесообразно проводить на предмет разработки оптимальной конструкции щелевого питателя и специальных устройств, вводимых в состав ЛС.



### Список литературы

1. Назаратин В. В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. – М.: Машиностроение, 2006. – 234 с.
2. Василевский П. Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
3. Голод В. М., Денисов В. А. Теория, компьютерный анализ и технология стального литья. – СПб.: ИПЦ СПГУТД, 2007. – 610 с.
4. Романов А. С., Леушин И. О. Функционально-модульная литниковая система с применением физических эффектов гидравлической природы // Литейщик России. – 2011. – № 12.

Поступила 21.02.2014

**К сведению читателей  
и подписчиков!**

**Телефон редакции  
журнала «Процессы литья»:  
(044) 424-04-10**