

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.742

Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И., Явтушенко П.М.

МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПОВЕДЕНИИ ЖИДКОПОДВИЖНОЙ САМОТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОСТЕННОГО СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ

Аннотация. В центре внимания авторов производство качественных тонкостенных стальных отливок, получаемых специальными способами точного литья. Одной из основных причин низкого качества стальных тонкостенных отливок и, как следствие, образования таких дефектов, как пригар, грубая поверхность, шероховатость, ужимина и недолив, является несовершенство литейной формы. Помимо этого, специфические проблемы тонкостенного стального литья связаны с недостаточным уровнем жидкотекучести сплава в области рабочих температур заливки, а также возникающим противодействием сплаву, заполняющему узкие участки формы, соответствующие тонким стенкам будущей отливки, обусловленным ограниченной газопроницаемостью литейной формы. Жидкоподвижная самотвердеющая смесь вполне подходит на роль материала формы благодаря своей высокой газопроницаемости, податливости, низкой влажности и текучести. В этой связи в качестве цели работы авторами выбиралось построение модельного представления о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья. По результатам проведенного анализа открытых источников информации построена и детально проанализирована кривая течения смеси. На кривой выделены пять характерных этапов, каждому из которых в соответствие поставлены типы неньютоновских жидкостей согласно известной классификации. Представленная версия модельного представления не только способствует более глубокому пониманию физического и физико-химического взаимодействия компонентов смеси, но и дает теоретическую основу для разработки смесей новых составов, обладающих повышенной технологичностью, что, в свою очередь, создает предпосылки для обеспечения стабильно высокого качества тонкостенного стального литья, получаемого с их применением.

Ключевые слова: тонкостенное стальное литье, жидкоподвижная самотвердеющая смесь, неньютоновская жидкость, кривая течения, технологичность, газопроницаемость, текучесть, податливость.

Введение

Получение качественных тонкостенных стальных отливок по-прежнему остается одной из актуальных проблем российского литейного производства. Не в последнюю очередь это связано с имеющей место зависимостью отечественных предприятий от импорта оборудования и материалов, а также хроническим отставанием технологий производства стального литья, реализуемых в действующем производстве, от трендов общемировых технических новаций. Дело осложняется тем, что на протяжении последних десятилетий на государственном уровне проблеме уделялось недостаточно внимания и в условиях санкционного давления на Россию стран Запада возможности использовать готовые зарубежные решения свелись к минимуму. При этом потребность в тонкостенных стальных литых заготовках высокого качества со стороны предприятий машиностроения, металлургии, оборонного комплекса постоянно растет [1-3], поэтому проблема только обостряется.

В сложившейся ситуации учеными и аспирантами кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева было принято решение сфокусировать на ней свое внимание.

Проведенный авторами статьи информационно-аналитический обзор результатов исследований,

опубликованных в открытой печати, показал, что в отечественной практике для производства тонкостенных отливок применяют специальные способы точного литья, основанные на формировании сложной геометрии рабочей полости термоудаляемыми моделями – литье по газифицируемому, выжигаемому и аддитивным выжигаемым моделям [4-8].

При этом одной из основных причин низкого качества стальных тонкостенных отливок и, как следствие, образования таких дефектов, как пригар, грубая поверхность, шероховатость, ужимина и недолив, является несовершенство литейной формы. Помимо этого, специфические проблемы тонкостенного стального литья связаны с недостаточным уровнем жидкотекучести сплава в области рабочих температур заливки, а также возникающим противодействием сплаву, заполняющему узкие участки формы, соответствующие тонким стенкам будущей отливки, обусловленным ограниченной газопроницаемостью литейной формы [1-3].

По данным [1-3], такие традиционные технологические приемы, как перегрев расплава и/или увеличение металлостатического напора в литниково-питающей системе, чаще всего не дают эффекта, поскольку чреваты повышением рисков получения усачных дефектов и снижением технологического выхода годного из-за увеличения массовой доли литниково-питающей системы относительно самой отливки. Нанесение покрытий на поверхность рабочей по-

лости формы либо оказывается невозможным, либо не обеспечивает желаемого результата.

Как следствие, на первый план выходит увеличение газопроницаемости материала литейной формы в сочетании с внешним воздействием на систему «форма – стальной расплав», например, вакуумированием. В этой связи внимание авторов данной статьи привлекла жидкоподвижная самотвердеющая смесь (ЖСС), которая вполне подходит на роль материала формы благодаря своей высокой газопроницаемости, достигающей уровня 400 единиц после затвердевания. Выбор ЖСС, в некоторых источниках называемой наливной, был вызван еще и тем, что она не требует механического уплотнения при формовке, а просто заполняет рабочую полость оснастки благодаря своей текучести. Наряду с высокой газопроницаемостью ЖСС податлива при низкой влажности (не более 5-6%) и приемлемой прочности на сжатие [9, 10], что, в свою очередь, может быть гарантией хорошего заполнения стальным расплавом тонких частей рабочей полости формы и минимума дефектов в отливке (в первую очередь речь идет о недоливе и неслитинах).

Проведенный многими исследователями, в том числе и авторами данной статьи, предварительный сравнительный анализ вариантов технической схемы получения тонкостенного стального литья убедительно доказывает ведущую роль формы и формовочной смеси в обеспечении качества отливок. В этой связи в качестве цели работы выбиралось построение модельного представления о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья.

Исходная информация

Жидкоподвижные самотвердеющие смеси, или наливные смеси, – это формовочные смеси, сочетающие в себе свойства жидкости, позволяющие получать стержни и формы свободной заливкой и затвердевать на воздухе в заданное время. Получение этих смесей с общей низкой влажностью, основанное на их переходе в подвижное состояние при введении пенообразующих поверхностно-активных веществ (ПАВ) и последующем затвердевании смеси от введенных отвердителей [9, 11], было разработано в первой половине 1960-х в ЦНИИТМаш и получило широкое распространение в литейном производстве СССР [12]. Позднее ЖСС нашли применение при изготовлении гипсовых и объемных керамических форм.

Результаты работы и их обсуждение

Использование ЖСС имеет свою специфику. ЖСС помимо наполнителя содержит в своем составе три основных компонента – связующее (как правило, жидкое стекло), пенообразующее ПАВ и отвердитель. Смесь характеризуется текучестью (подвижностью), а потому не требует приложения внешних усилий для заполнения рабочей полости оснастки и заполняет ее что называется «самотеком» под воздействием лишь

гравитационного поля (лишь в случае производственной необходимости дополнительно используется вибрационное воздействие на оснастку). Кроме того, ЖСС схватывается и затвердевает без использования внешнего тепла. Еще одной особенностью ЖСС является наличие в ее составе пенообразователя для формирования после затвердевания смеси системы сообщающихся пор, обеспечивающих высокую газопроницаемость литейной формы.

Все это вместе с результатами работ, проведенных в ЦНИИТМаш Борсуком П.А. и Жуковским С.С., позволяет отнести ЖСС к числу так называемых структурированных жидкостей, или жидкостей, обладающих пространственной структурой, не подчиняющихся законам Ньютона (неньютоновские), для которых напряжение сдвига τ прямо пропорционально скорости деформации (сдвига) $\dot{\gamma}$, причем в качестве коэффициента пропорциональности выступает кажущаяся вязкость μ :

$$\tau = \mu \dot{\gamma}. \quad (1)$$

График зависимости между напряжением и скоростью сдвига – так называемая «кривая течения» – для ньютоновской жидкости представляет собой прямую линию (рис. 1), проходящую через начало отсчета с тангенсом угла наклона μ , причем эта единственная постоянная полностью характеризует жидкость [13].

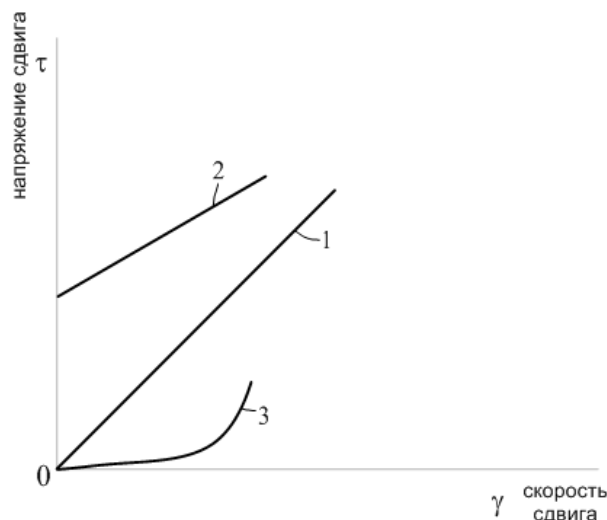


Рис. 1. Кривые течения идеальных жидкостей: 1 – ньютоновская; 2 – бингамовская; 3 – дилатантная

Кривые течения у идеальных неньютоновских жидкостей (бингамовская или дилатантная) ведут себя иначе.

У бингамовской жидкости это прямая, пересекающая ось ординат на некотором расстоянии от начала отсчета. Это расстояние соответствует напряжению текучести, превышение которого ведет к возникновению вязкого течения. Объяснение такого поведения, согласно гипотезе Ф.Н. Шведова, основывается на предположении о наличии у покоящейся жидкости некоторой пространственной структуры, способной

сопротивляться напряжению сдвига, не превышающему предел текучести. Если предел текучести все же превышен, жидкость ведет себя практически как ньютоновская, при этом угловой коэффициент ее прямой течения зависит от меняющейся вязкости, но линейный характер зависимости в целом сохраняется.

У дилатантной жидкости отсутствует предел текучести, поэтому кривая течения идет из начала отсчета, однако кажущаяся вязкость жидкости повышается с возрастанием скорости сдвига нелинейно (визуально – по степенному закону с показателем, большим единицы).

Реальные жидкости имеют нелинейную кривую течения, что может быть обусловлено не только характером зависимости их поведения от напряжения сдвига, но и от времени проявления напряжения, предыстории и особой реологии жидкости.

В этой связи нет ничего необычного в том, что кривая течения ЖСС, экспериментально полученная П.А. Борсуком и С.С. Жуковским (рис. 2), носит явно нелинейный характер.

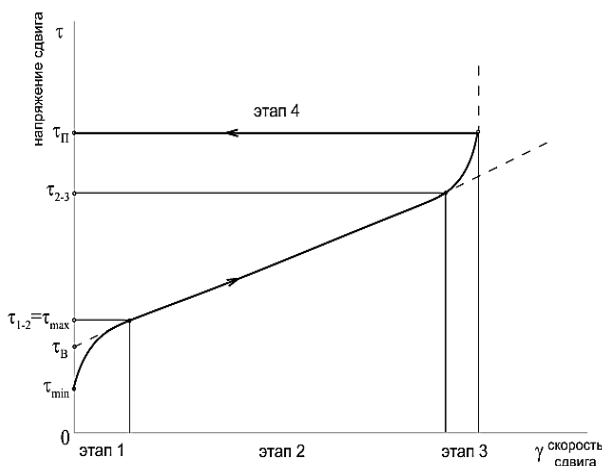


Рис. 2. Кривая течения ЖСС (по данным П.А. Борсука и С.С. Жуковского):

этап 1 – бингамовская пластичная жидкость (бингамовский пластик); этап 2 – псевдопластичная жидкость с тиксотропными свойствами; этап 3 – дилатантная жидкость с реопектическими свойствами; этап 4 – идеально затвердевающее реологическое тело Прагера

Из рис. 2 видно, что разрушение структуры ЖСС как неньютоновской аномальной жидкости происходит не спонтанно, а постепенно. На кривой можно выделить пять характерных напряжений сдвига:

- $\tau_{\min}$ – минимальное, соответствующее началу разрушения пространственной структуры;
- τ_B – предел текучести по Бингаму;
- $\tau_{\max}$ – максимальный предел текучести, соответствующий полному разрушению структуры жидкости;
- τ_{2-3} – напряжение сдвига, соответствующее началу вторичного структурообразования;

– τ_{Π} – предел текучести по Прагеру, соответствующий полной остановке течения, а на кривой течения – соответственно четыре участка или этапа.

На первом этапе, включающем участок от начала движения до достижения $\tau_{\max}$, ЖСС в соответствии с классификацией неньютоновских жидкостей, предложенной У.Л. Уилкинсоном [13], характеризуется как бингамовская пластичная жидкость (бингамовский пластик). Кривая течения для таких материалов представляет собой гладкую кривую, соответствующую степенной зависимости с показателем, меньшим единицы, которая пересекает ось напряжения сдвига τ на некотором расстоянии $\tau_{\min}$ от ее начала. Поведение бингамовских пластиков объясняется предположением о том, что у покоящейся жидкости имеется пространственная структура, достаточно жесткая, чтобы сопротивляться любому напряжению, не превосходящему по величине $\tau_{\min}$. Если же напряжение сдвига превышает $\tau_{\min}$, то на протяжении интервала от $\tau_{\min}$ до $\tau_{\max}$, включающего характерное значение τ_B , структура полностью или частично разрушается и далее система ведет себя как ньютоновская жидкость или близко к этому.

На втором этапе, включающем собственно фрагмент графика степенной зависимости (визуально – линейной) от $\tau_{\max}$ до τ_{2-3} , ЖСС – псевдопластичная жидкость, обладающая тиксотропными свойствами, такими как разрушение структуры при сдвиге, когда консистенция материала зависит не только от величины скорости γ , но и от продолжительности сдвига. Псевдопластичные жидкости не обнаруживают предела текучести, а по кривой течения таких жидкостей видно, что отношение напряжения к скорости сдвига, т.е. кажущаяся вязкость, постепенно снижается с ростом скорости сдвига. Соответствующая графическая зависимость близка к степенной, причем с показателем, по-прежнему меньшим единицы. Физическое толкование псевдопластичности заключается в том, что с возрастанием скорости сдвига асимметричные частицы ЖСС ориентируются вдоль направления потока и кажущаяся вязкость с ростом скорости сдвига убывает до тех пор, пока сохраняется возможность такой ориентации, после чего кривая течения стабилизируется и приобретает линейный характер. На участке оси ординат между $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$ находится значение τ_B , соответствующее виртуальной точке пересечения этой оси с продолжением графика второго этапа.

На третьем этапе, соответствующем фрагменту кривой между τ_{2-3} и τ_{Π} , ЖСС соответствует дилатантной жидкости с реопектическими свойствами (структурообразование при нарастании сдвига), вязкость которой возрастает с увеличением скорости сдвига γ , т.е. фактически имеет место переход от жидкости к твердому телу (затвердевание). При этом степенная зависимость сохраняется, но ее показатель уже существенно превышает единицу. Дилатантные жидкости сходны с псевдопластичными тем, что для них также не выражен предел текучести, но кажущаяся вязкость с

ростом скорости сдвига у них возрастает. По версии Рейнольдса, впервые обнаружившего дилатантный тип течения в суспензиях при высоком содержании твердой фазы, эти суспензии в состоянии покоя имеют минимальный объем прослоек между твердыми частицами, а жидкости хватает исключительно для заполнения этих прослоек. Когда такие материалы подвергаются сдвигу с небольшой скоростью деформации, жидкость служит смазкой, уменьшающей трение твердых частиц друг о друга, и напряжения не слишком велики. При больших сдвигах плотная упаковка частиц нарушается, размеры жидких прослоек возрастают, материал «разбухает», жидкости становится недостаточно для смазки трущихся частиц, напряжения возрастают и наблюдается формирование структуры.

По ходу индукционного периода отверждения вплоть до прекращения течения ЖСС переходит в категорию сложных реологических тел [14-17]. Однако если принять допущение о том, что отверждение ЖСС и переход в состояние с нулевой газопроницаемостью происходит не параллельно с ее течением, а мгновенно, сразу после прекращения течения смеси, то ее поведение *на четвертом этапе* будет соответствовать так называемому идеально затвердевающему реологическому телу Прагера [16]. Это означает, что формирование структуры ЖСС наступает немедленно после остановки потока, заполняющего оснастку, а в дальнейшем при объемной деформации форма из ЖСС ведет себя как жесткое несжимаемое тело, несмотря на наличие в нем системы сообщающихся пор по причине пенообразования ПАВ. Это подтверждается экспериментально [18] тем, что сразу после приготовления жидкие смеси практически не имеют газопроницаемости, которая восстанавливается в процессе твердения в результате самопроизвольного разрушения пузырьков пены.

Однако повышенная газопроницаемость не только создает предпосылки для обеспечения хорошей податливости материала ЖСС в условиях высокотемпературного прогрева, что очень важно для производства тонкостенного литья, но и ведет к снижению поверхностной прочности формы и увеличению рисков механического пригара и шероховатости отливок и вынуждает принимать меры по улучшению качества поверхности рабочей полости формы, такие как нанесение покрытия (окрашивание) или использование керамики в рабочем слое.

По мнению авторов данной статьи, все это еще раз доказывает приоритетность правильности выбора ПАВ и отвердителя в составе ЖСС, поскольку именно они в наибольшей степени определяют технологичность смеси (газопроницаемость, текучесть, живучесть, податливость, выбиваемость).

При выборе ПАВ для приготовления ЖСС В.А. Васильев [17] рекомендует низшие, средние гомологи ПАВ или их смеси с ориентировочной длиной углеводородного радикала в пределах 6-16, но не более 20

атомов углерода. Тот же автор считает наиболее подходящими для обеспечения высокой пенообразующей способности и заданной устойчивости пены анионактивные ПАВ, к которым относит прежде всего алкиларилсульфонаты, а также алкилсульфаты и алкилсульфонаты. Такие ПАВ диссоциируют в воде на отрицательно заряженный анионактивный комплекс и неактивный отрицательно заряженный ион металла (например, Na^+). Анионактивные комплексы ПАВ адсорбируются на поверхности зерен наполнителя смеси, гидрофилизировав их, образуя слой «жесткой» воды. При этом снижается поверхностное натяжение на границе раздела фаз, существенно уменьшаются силы трения между твердыми частицами наполнителя смеси, разделенными прослойками и пленками воды, нивелируя влияние шероховатости поверхности зерен наполнителя, облегчая их перемещение друг относительно друга, уменьшая агрегатирование и коагуляцию и обеспечивая течение ЖСС.

Что касается выбора отвердителя ЖСС на основе жидкого стекла, делая его, необходимо учитывать, что механизм отверждения в этом случае основывается на разложении силикатов калия или натрия (в зависимости от вида жидкого стекла) под воздействием растворимых в воде органических или неорганических кислот либо гидроксидов щелочноземельных металлов (силикатов кальция и алюминия, часто входящих в состав шлаков металлургического производства) и образовании гелеобразных продуктов реакций.

Заключение

Модельное представление о поведении ЖСС при производстве тонкостенного стального литья, предложенное авторами данной статьи по результатам проведенного анализа открытых источников информации, не только способствует более глубокому пониманию физического и физико-химического взаимодействия компонентов смеси, но и дает теоретическую основу для разработки ЖСС новых составов, обладающих повышенной технологичностью, что, в свою очередь, создает предпосылки для обеспечения стабильно высокого качества тонкостенного стального литья, получаемого с их применением.

Список литературы

1. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.
2. Производство отливок ответственного назначения: монография / М.И. Карпенко, В.А. Алов, А.П. Мельников, В.М. Карпенко. Ярославль: Наука, 2012. 256 с.
3. Десницкий В.В., Матвеев И.А., Десницкая Л.В. Деформационные процессы при формировании ответственных стальных отливок // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №11. С. 12-15.

4. Инновации в литье по выплавляемым моделям: монография / К.В. Никитин, А.В. Соколов, В.И. Никитин, В.Н. Дьячков. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 144 с.
5. Калужный П.Б., Кротюк С.О., Левчук М.Т. Технологические процессы получения стальных литых изделий для запорной трубопроводной арматуры по газифицируемым моделям // Литье и металлургия. 2018. №1(90). С. 21-23.
6. Литье в песчано-гипсовые формы тонкостенных отливок из Al-сплавов с выплавляемой моделью из PLA-пластика / В.А. Изотов, А.А. Акутин, Ю.С. Федулова, А.С. Равочкин, В.М. Федулов, А.А. Вишталюк // Литейное производство. 2015. №5. С. 15-18.
7. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: Профессионал, 2007. 408 с.
8. Яковышин О.А. Ресурсосберегающая технология изготовления газифицируемых моделей для литейного производства // Экология и промышленность. 2019. №2(59). С. 24-33.
9. Борсук П.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
10. Илларионов И.Е., Васин Ю.П. Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1995. Ч. 2. 288 с.
11. Иванов В.Н., Зарецкая Г.М. Литье в керамические формы по постоянным моделям. М.: Машиностроение, 1975. 136 с.
12. Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
13. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.
14. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
15. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.
16. Матвеев И.В. Основы реологии формовочной смеси. М.: МГИУ, 2003. 80 с.
17. Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 336 с.
18. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. Литейные формовочные материалы: формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.

Сведения об авторах

Леушин Игорь Олегович – заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия. E-mail: igoleu@yandex.ru

Грачев Александр Николаевич – доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия. E-mail: mto@nntu.ru.

Леушина Любовь Игоревна – доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия. E-mail: kafmto@mail.ru.

Явтушенко Павел Михайлович – аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (федеральный опорный университет), Нижний Новгород, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODEL CONCEPT OF THE BEHAVIOR OF A LIQUID-MOVING SELF-CURING MIXTURE IN THE PRODUCTION OF THIN-WALLED STEEL CASTING

Leushin I.O. – Dr. Sci. (Tech), Prof., Head of the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod. E-mail: igoleu@mail.ru.

Grachev A.N. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhny Novgorod. E-mail: mto@nntu.ru.

Leushina L.I. – Cand. Eng., Associate Prof., Associate Prof., the Chair «Metallurgical technologies and equipment», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhny Novgorod. E-mail: mto@nntu.ru.

Yavtushenko P.M. – postgraduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Nizhny Novgorod.

Abstracts. The focus of the authors is on the production of high-quality thin-walled steel castings obtained by special methods of precision casting. One of the main reasons for the poor quality of steel thin-walled castings and, as a result, the formation of such defects as burn-in, rough surface, roughness, finesse and underfilling, is the imperfection of the casting mold. In addition, the specific problems of thin-walled steel casting are associated with an insufficient level of fluidity of the alloy in the range of working temperatures of casting, as well as the emerging back pressure of the alloy filling narrow sections of the mold corresponding to the thin walls of the future casting, due to the limited gas permeability of the casting mold. A liquid self-hardening mixture is quite suitable for the role of a mold material due to its high gas permeability, flexibility, low moisture content and fluidity. Based on the results of the analysis of open sources of information, the mixture flow curve was constructed and analyzed in detail. The curve shows five characteristic stages, each of which is assigned the types of non-Newtonian fluids according to the well-known classification. The presented version of the model representation not only contributes to a deeper understanding of the physical and physicochemical interaction of the components of the mixture, but also provides a theoretical basis for the development of mixtures of new compositions with increased manufacturability, which, in turn, creates the prerequisites for ensuring a consistently high quality of thin-walled steel casting obtained with their use.

Keywords: thin-walled steel casting, liquid self-hardening mixture, non-Newtonian liquid, flow curve, manufacturability, gas permeability, fluidity, pliability.

Ссылка на статью:

Модельное представление о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья / И.О. Леушин, А.Н. Грачев, Л.И. Леушина, П.М. Явтушенко // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 13-18.
Leushin I.O., Grachev A.N., Leushina L.I., Yavtushenko P.M. Model concept of the behavior of a liquid-moving self-curing mixture in the production of thin-walled steel casting. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 13-18.