



*The analysis of technologies of modifying has shown that maximal efficiency is reached at input of additives by the methods allowing to distribute them in regular intervals to distribute them evenly on volume of metal and to provide the minimum charcoal fumes in atmosphere.*

С. В. КОРНЕЕВ, В. А. РОЗУМ, И. А. ТРУСОВА, А. П. БЕЖОК, С. П. ЗАДРУЦКИЙ, БНТУ

УДК 621.74:669.13

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

**Введение.** Анализ свойств различных марок стали показывает, что повышение предела прочности сопровождается снижением ударной вязкости, которая, в свою очередь, зависит от пластичности. Изменение режима термообработки (применение закалки, варьирование температуры отпуска) позволяет повысить механические свойства для конкретной марки стали.

Уменьшение размера зерна, внутризеренное залегание первичных фаз, а также более чистые границы способствуют повышению пластичности при одновременном сохранении высокого уровня прочности. Это достигается технологией изготовления отливки, которая может включать операции рафинирования, термовременную обработку, легирование, раскисление и модифицирование. При модифицировании в основном «улучшается» структура литой стали, а именно, измельчается зерно, изменяется форма неметаллических включений и дополнительно происходит раскисление металла. Модифицирующие присадки влияют на величину переохлаждения расплава и изменяют поверхностное натяжение на границе жидкая – твердая фаза, влияя, тем самым, на процесс кристаллизации стали.

Согласно современным теориям, все модификаторы делятся на две группы: первого рода, к которым относятся вещества, являющиеся центрами кристаллизации, и второго рода – поверхностно-активные вещества, тормозящие рост кристаллов. Кроме того, модификаторы второго рода также оказывают существенное влияние на протекание процессов вторичной кристаллизации. Адсорбируясь на поверхности определенных фаз, они затормаживают диффузионные процессы, тем самым, повышая устойчивость упрочняющих фаз, что существенно влияет на эксплуатационные свойства высоколегированных сталей. Высокая устойчивость твердого раствора при термической

обработке и длительной эксплуатации, повышенная стойкость к коагуляции и высокая дисперсность выпадающих фаз способствуют большей стабильности жаропрочных свойств при эксплуатации отливок при высоких температурах.

В связи с многокомпонентностью составов жаропрочных сплавов выбор модификатора, определение оптимальной добавки и метода ввода зависит от многих факторов и подбирается, как правило, экспериментальным путем.

Эффективность модифицирования сталей зависит от состава модификаторов и способов их ввода в расплав. При разработке составов и определении количества присаживаемого модификатора необходимо также учитывать марку обрабатываемой стали.

В качестве модифицирующих присадок для стали широко используются редкоземельные, щелочноземельные и редкие металлы, влияющие на процесс кристаллизации и изменяющие физические свойства расплава. При разработке состава модификатора для конкретных марок сталей эти элементы используются в различных процентных соотношениях.

В последнее время для модифицирования сталей, чугунов и других сплавов начали использовать частицы малых размеров («наночастицы»). Это позволяет значительно повысить механические и эксплуатационные свойства сплавов, а также придать им специфические характеристики. Однако широкое внедрение «наномодификаторов» ограничено тем, что к настоящему времени недостаточно отработаны технологии ввода их в расплав. Поэтому отработка композиции на основе «нанопорошков» и технологии их ввода является весьма актуальной задачей.

**Методы оценки эффективности действия модификатора.** Модифицирующая обработка предназначена для улучшения комплекса механи-

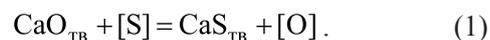
ческих, технологических и специальных эксплуатационных свойств стали, поэтому основным методом оценки эффективности является контроль свойств стали в случае применения модифицирующей обработки и при ее отсутствии. При этом необходимо обеспечить аналогичные условия получения расплава для сравнения этих свойств при различных способах обработки.

Модифицирование сталей щелочноземельными и редкоземельными металлами является одним из эффективных технологических приемов, позволяющих повысить их эксплуатационные характеристики. Однако модифицирующая способность этих добавок имеет нестабильный характер и определяется в первую очередь степенью раскисления, которая влияет на форму выделяющихся неметаллических включений. Наиболее широко применяемым элементом для этих целей является алюминий. В зависимости от химического состава стали и остаточного содержания алюминия могут образовываться сульфиды трех типов. При небольшом содержании алюминия сульфиды кристаллизуются в глобулярной форме. Если металл хорошо раскислен, но остаточное содержание алюминия небольшое, то выделяются сульфиды эвтектического происхождения в виде пленок, расположенных по границам зерен. Высокая концентрация алюминия приводит к образованию сульфидов третьего типа – частиц неправильной остроугольной формы. Наименьшее отрицательное влияние на свойства стали оказывает первый тип включений глобулярной формы. Поэтому технология модифицирования и раскисления должна обеспечивать получение неметаллических включений первого типа.

Для получения сульфидов первого типа необходимо иметь в стали низкое содержание алюминия, но при этом сложно обеспечить достаточную степень раскисления и размер зерна. Повышение расхода алюминия может привести к образованию нитридов алюминия, выделяющихся в виде плен и резко снижающих прочностные свойства. Так как предельные концентрации алюминия, при которых образуется та или иная форма включений, зависят от химического состава стали, содержания серы и кислорода, технология модифицирования щелочноземельными и редкоземельными металлами должна разрабатываться для каждой стали с учетом перечисленных выше факторов. Наиболее высокая эффективность модифицирования достигается в том случае, когда ШЗМ будут взаимодействовать только с серой, формируя глобулярные включения.

Для анализа процессов модифицирования может применяться термодинамический метод, осно-

ванный на расчете условий равновесия реакций, протекающих при заключительной обработке расплава. Предварительная десульфурация расплава оксидом кальция будет способствовать повышению эффективности действия модифицирующих присадок. Реакция десульфурации расплава оксидом кальция:



Применяя закон Гесса, реакцию можно представить в виде отдельных звеньев, включающих растворение кислорода и серы в расплаве, плавление кальция, реакцию жидкого кальция с твердой серой, что позволяет определить изменение свободной энергии реакции (1). Дальнейший анализ с учетом параметров взаимодействия показывает, что взаимодействие кальция с серой в условиях сталеплавильного процесса может протекать только при достаточно низком содержании кислорода.

Раскисление марганцем и кремнием не обеспечивает достаточную степень раскисления. Одним из наиболее сильных раскислителей, позволяющих снизить концентрацию кислорода до равновесной ( $\approx 1 \cdot 10^{-3}\%$ ), является алюминий. Остаточный алюминий взаимодействует с кальцием, образуя алюминат кальция глобулярной формы. При этом для протекания этого процесса необходимо очень тщательно контролировать содержание кальция и алюминия. Введенный в расплав кальций может частично восстанавливать корунд во включения алюминатов кальция, которые всегда находятся в жидком состоянии при температурах порядка 1600 °С. Таким образом, используя данный метод, возможно определить наиболее эффективную последовательность ввода различных присадок.

О прочности соединений можно косвенно судить по теплоте их образования. Для соединений с РЗМ теплота образования уменьшается в следующем порядке: оксиды, сульфиды, нитриды, гидриды. Для более полного анализа условия образования различных соединений необходимо рассматривать изменение энергии Гиббса при температуре сталеплавильного процесса.

При использовании в качестве модификаторов тугоплавких металлов следует также учитывать их термодинамическую активность в пределах однопольных соединений. Для нитридов термодинамическая устойчивость соединений уменьшается согласно следующему ряду: Zr, Ti, Al, Ce, Nb, V, W, Cr, Mn, Fe. В ряду карбидов термодинамическая устойчивость соединений – Zr, Ti, Nb, V, W, Mo, Cr, Mn, Fe. Например, для жаропрочных хромоникелевых сталей сопротивление ползучести при ле-

гировании твердых растворов определяется величиной скорости диффузии легирующих элементов и для использования этих сталей в широком диапазоне температур их необходимо легировать комплексно различными элементами, тормозящими дислокации при разных скоростях ползучести. Для никельсодержащих жаропрочных сталей основное упрочнение обеспечивает интерметаллидная фаза типа  $Ni_3(Al, Ti, Nb)$ . В общем случае присутствие определенного количества карбидных фаз в жаропрочных никелевых сталях оказывает положительное влияние, препятствуя межзеренному скольжению, но выделение карбидных фаз типа  $Me_{23}C_6$  часто приводит к охрупчиванию и понижению жаропрочности. Например, для Cr и Mn при температуре 1273 К термодинамически наиболее вероятны карбиды  $Me_{23}C_6$ , а для V, Nb, Mo, Ta, W –  $Me_2C$ . Также термодинамический анализ показывает, что при добавлении Zr, Ti и Nb будут преимущественно протекать реакции образования карбидов данных элементов, а также интерметаллидов. Эти соединения являются зародышами при образовании новых зерен аустенита в процессе нагрева и способствуют формированию более мелкого зерна аустенита по сравнению со сталью, не имеющей карбидных и нитридных фаз.

Время ввода присадок для образования тугоплавких инокуляторов имеет большое значение в связи с возможностью их значительного роста при высоких температурах. Например, при образовании нитридов титана при повышенных температурах в плавильном агрегате размер частиц TiN может достигать 40–50 мкм [1, 2]. Такие частицы устойчивы, при снижении температуры не распадаются и впоследствии отрицательно влияют на свойства стали. Для достижения положительных технологических эффектов управления структурой с использованием TiN необходимо наличие частиц размерами от 2 до 10 мкм [3–5]. Приращение изобарного потенциала  $\Delta G^\circ$  для реакции формирования нитрида титана в соответствии с химической реакцией  $Ti + N = TiN$  в зависимости от температуры примем на основании эмпирических данных [6] в виде:

$$\Delta G_T^0 = -302790 + 113,5T \text{ Дж/моль.}$$

Термодинамический метод анализа процессов образования TiN позволяет сделать вывод о том, что возникновение нитридов титана возможно как для полностью жидкого ( $T > T_{лик}$ ), так и для полностью твердого ( $T < T_{сол}$ ) металла. Возникновение частиц TiN в плавильной печи протекает в течение достаточно большого промежутка времени

(десятки минут) при повышенных температурах, что способствует формированию кристаллов нитрида титана крупных размеров (десятки мкм), и в конечном продукте (литой заготовке) можно ожидать присутствия тугоплавких и относительно крупных неметаллических включений TiN, вызывающих охрупчивание литой стали и склонность к трещинообразованию металла, что нередко фиксируется в производственных условиях. Таким образом, при модифицировании структуры нитридами титана необходимо обеспечить условия, при которых их формирование будет происходить по возможности на более поздних стадиях. При таком введении добавок следует ожидать возникновения достаточно тонкодисперсных частиц TiN, препятствующих избыточному развитию столбчатых дендритов.

Кроме рассмотренного термодинамического метода анализа взаимодействия модифицирующих добавок с различными соединениями, существуют также и другие методы, позволяющие оценить количественную характеристику модифицирующей активности добавок.

Модифицирующая активность примесей в растворе может быть представлена в следующем виде [7]:

$$\mu \approx (U_{эф}^M - U_{эф}^3) / C_{кл},$$

где  $U_{эф}^M$ ,  $U_{эф}^3$  – эффективный ионизационный потенциал соответственно металла и примеси;  $C_{кл}$  – растворимость примеси в кластерах.

Величина  $\mu$  имеет различный знак для модификаторов и демодификаторов, т. е. имеет качественную характеристику. Для достижения наибольшего эффекта по измельчению зерна необходимо определенное количество свободного модификатора в расплаве, однако и простое удаление демодификаторов также будет способствовать повышению свойств. Величины относительной модифицирующей активности некоторых элементов приведены на рис. 1. Данные о растворимости примесей в кластерах и эффективных ионизационных потенциалах взяты из [7].

Из рисунка видно, что одними из наиболее сильных (после галогенов) демодификаторов являются сера, кислород и фосфор, которые традиционно считаются вредными примесями для большинства марок сталей. Наиболее сильными модификаторами служат редкоземельные и щелочноземельные металлы.

Результаты модифицирования определяются в основном содержанием активных элементов (Ca, PЗМ, Ti и др.) как в жидком металле, так и в готовой стали. Таким образом, учитывая, что часть до-

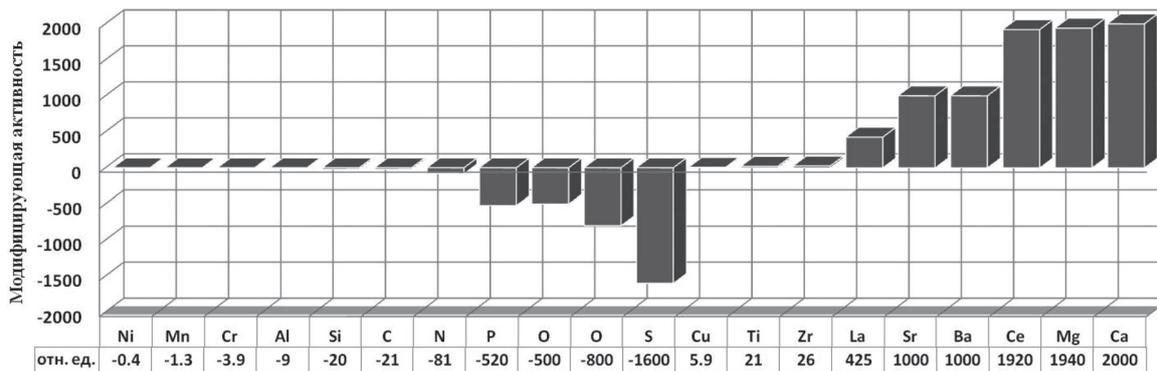


Рис. 1. Относительная модифицирующая активность некоторых элементов

бавок входит в состав оксидной фазы, необходимо различать общее содержание элемента в составе стали и так называемое «эффективное», которое расходуется на регулирование состава и формы сульфидных включений.

Рассмотренные выше теоретические положения подтверждаются многочисленными экспериментальными данными. Например, влияние количественного содержания серы и кислорода на эффективное содержание РЗМ исследовалось различными авторами с получением эмпирических зависимостей, из которых следует, что повышение содержания серы и кислорода требует увеличения расхода модификатора. Различие в данных, получаемых по этим зависимостям, связано с разными условиями экспериментов и составами сталей при проведении исследований.

Помимо содержания кислорода и серы, необходимо учитывать соотношение между содержанием кальция и алюминия, который является основным раскислителем, т. е. количество вводимого кальция должно определяться содержанием алюминия в стали перед обработкой, их оптимальное соотношение способствует снижению зарастания сталеразливочного канала.

Как было показано выше, параметром, позволяющим оценить действие комплексного модификатора, является остаточное содержание вводимых элементов в готовом металле. Однако количество вводимого модификатора также зависит от выбора способа ввода его в расплав. Это связано с тем, что степень усвоения модификатора, непосредственно оказывающая влияние на эффективность его действия, определяет его расход и экономические аспекты внедрения в производственный процесс.

Степень усвоения модификатора напрямую связана с двумя характеристиками его применения: угаром и рафинирующим действием. При этом под угаром следует понимать потери модификатора при его контакте с окислительной средой, а эффект непосредственного раскисления рас-

плава относить к рафинирующему действию. В связи с этим необходимо учитывать два момента: обеспечение минимального контакта модификатора с воздушной средой и использование предварительного рафинирования расплава более дешевыми способами и с применением более дешевых материалов [8].

Факторами, влияющими на эффективность действия модификатора, являются химический состав получаемой стали, исходный состав расплава (особенно содержание кислорода и серы), температура расплава, состав газовой среды над расплавом, количество и состав шлака, способ ввода модификатора, последовательность и длительность операций по рафинирующей и модифицирующей обработке расплава.

**Технологии модифицирования жидкого расплава.** В настоящее время большинство добавочных материалов вводится в жидкую сталь в кусковом виде различными способами: подает на желоб во время выпуска металла из сталеплавильного агрегата, подачей под струю и подачей в ковш перед выпуском металла. Основной проблемой этих способов ввода является большой угар элементов, имеющих высокое сродство к кислороду, и невысокая стабильность результатов усвоения. Большое значение имеют оптимальные размеры кусков вводимых материалов. Известно, что пылевидные фракции значительно окисляются вследствие большой удельной поверхности и легкости выноса на поверхность потоками металла, а относительно крупные медленно плавятся и растворяются и менее склонны к проникновению вглубь металла после их всплывания к поверхности. Также различными исследованиями показано, что применение для обработки металла концентрированных модификаторов менее эффективно, чем в составе комплексных присадок.

Для снижения угара элементов изменяют место ввода материала (на дно ковша, на струю металла в ходе его разливки, инмолд-процесс и т. п.),

применяют принудительное погружение в жидкий металл (на штанге в печь или ковш, в «колоколе», в виде кольца, укрепляемого на стопоре), подбирают оптимальный размер фракций материала для конкретного способа ввода, а также подбирают оптимальное содержание основного элемента в модификаторе и сопутствующих элементов.

Каждый из способов может иметь свои модификации, позволяющие повысить его эффективность, например, для повышения степени усвоения модификатора при вводе его на дно ковша материал закладывают в специальную камеру и погружают стружкой. Погружение модификатора в расплав можно обеспечить также при помощи колокола либо утапливаемых блоков, для удержания раскислителей или модификаторов в объеме металла можно использовать стопор ковша. Например, на Белоозерском энергомеханическом заводе сталь раскисляют в ковше алюминиевым кольцом, закрепленном на стопоре, с дополнительной обработкой силикокальцием, вводимым на струю стали при заполнении ковша.

Известны также различные установки по вводу легкоокисляющихся добавок в металл в ходе его разливки. Как правило, они содержат рабочий стенд, бункер-накопитель, расходный бункер, роторный питатель и виброконвейер с желобом. Применение подобных установок позволило повысить эффективность воздействия вводимых добавок на металл. Дозаторы могут располагаться на специальной тележке, перемещающейся вдоль разливочной площадки или на сталевозе с подачей материала к струе шнековым транспортером или компактно размещаться на стальковше.

Большое распространение при внепечной обработке стали получил метод вдувания порошкообразных материалов. Наиболее распространенным реагентом, используемым в составе вдуваемых смесей, является кальций и комплексные раскислители, содержащие кальций. Жидкую сталь выпускают в ковш, закрываемый затем крышкой, через которую вводят фурму для вдувания кальция в струю аргона.

Другим распространенным способом ввода порошкообразных материалов является использование порошковой проволоки (ПП). Такую проволоку вводят в металл, находящийся в ковше, с заданными скоростью и расходом материала при помощи специальных аппаратов (трайб-аппаратов). Такой способ ввода предотвращает взаимодействие реагента с расплавом в верхних слоях металла, способствуя плавлению реагента в нижних горизонтах жидкого металла, что увеличивает время контакта и позволяет более эффективно ис-

пользовать элементы, имеющие низкие температуры плавления, кипения и малую растворимость в металле. Технология ввода порошковой проволоки дает возможность уменьшить расход материалов для модифицирования, а также повысить эффективность ввода их в расплав и экологическую безопасность производства.

Существуют также и другие способы ввода модификаторов и раскислителей. Например, методы выстреливания пуль ABS (Aluminium Bullet Shooting) и SCAT (System of Calcium Adding Technique). Недостатком данных методов является отсутствие универсальности и необходимость в специальной предварительной подготовке вводимых материалов.

В последнее время для модифицирования стали начали широко применять технологию «ин-молд-процесс». Эта технология заключается во вводе модификаторов в камеру, непосредственно размещенной в форме. Такой способ позволяет повысить степень усвоения, исключить выделение дыма и пироэффект.

**Повышение эффективности методов ввода модификаторов.** Технология введения модификаторов в жидкую сталь разрабатывается с учетом ряда факторов: степени подготовленности металла к этой операции, времени присадки легкоокисляющихся добавок, их фракции (размера частиц) и расхода материала.

Таким образом, в соответствии с сортаментом стали, подвергаемой обработке, и задачами модифицирования необходим подбор параметров ввода легкоокисляющихся добавок в металл. Определяющее значение при этом имеет выбор модификатора, применение которого для обработки той или иной группы марок стали дает максимальный эффект.

Модификатор следует присаживать в хорошо раскисленный марганцем, кремнием, алюминием металл, минимизируя возможность окисления легкоокисляющихся реагентов модификатора (кальция, РЗМ и т. п.), имеющих высокое сродство к кислороду. Модифицирующий эффект достигает своего максимального значения практически сразу после ввода модификатора и со временем уменьшается.

Из множества способов и устройств введения модификаторов в сталь (как было показано ранее) в производстве стального литья и слитков в основном применяется модифицирование металла в ходе его выпуска в ковш, в самом ковше и в форме (ин-молд-процесс). Модифицирование металла в ходе его выпуска в ковш требует большого расхода модификатора (до 3–4 кг/т). Очищение металла от неметаллических включений, появляющихся в ре-

зультате реакций модификаторов с компонентами расплава, достигается в процессе выдержки металла после ввода модификатора. Но за время выдержки в ковше (10–15 мин) содержание модификатора в металле также значительно снижается.

Применение «нанопорошков» для модифицирования позволяет значительно сократить расход модификаторов при ковшевой обработке, а, следовательно, избежать большой вероятности загрязнения металла неметаллическими включениями. Однако технология ввода такого рода присадок весьма сложная и требует дополнительных исследований и доработки.

Как показали выполненные нами исследования, оптимальная структура жаропрочной стали с минимальным количеством и размером карбидных включений по зерну аустенита, полным их отсутствием по границам и сотовой структурой дендритов аустенита получается при предварительной обработке расплава в печи присадками, содержащими «нанопорошки» на основе редких металлов после раскисления, и последующем модифицировании в ковше кальций-барий-стронциевыми карбонатами. Основные параметры по расходным характеристикам барий-стронциевых карбонатов экспериментально были подобраны при проведении лабораторных и опытных плавов. Расход барий-стронциевого карбоната составил 0,5%, после предварительного раскисления стали алюминием – 0,15%. Однако при вводе «нанопорошков» большая часть их уносилась потоками газов, выделяющихся при заполнении ковша, поэтому усвоение их низкое, а расход присадки высокий и составлял 0,1–0,2%. Для повышения степени усвоения необходимо было подобрать материалы и разработать технологию подготовки порошков, обеспечивающую их погружение в расплав и равномерное растворение.

Описанные выше методы ввода модификаторов не обеспечивают высокого усвоения порошков. Ввод модификатора путем закатки его в проволоку не обеспечивает равномерности подачи, так как необходимо вводить сотые доли процентов от массы обрабатываемого металла. Вдувание в струю заливаемого металла не обеспечивает подачи одинаковой порции из-за распыления. Изготовление брикетов с тяжелыми наполнителями путем прессования приводит к нейтрализации модифицирующего действия «наночастиц».

Одно из направлений, по которому ведутся работы разными исследователями, связано с утяжелением вводимой присадки, что обеспечивает погружение их в объем металла и повышает коэффициент усвоения. Например, сотрудниками Омско-

го политехнического института предложена технология изготовления присадок с использованием полимерных покрытий (наполнителя), согласно которой нанопорошки вводятся в расплавленные полимеры в специальном автоклаве, а затем методом экструзии получают цилиндрики диаметром около 10 мм и длиной 30 мм. Цилиндрики используются для обработки расплава методом «сэндвич-процесса» либо подаются под струю металла. Эффект модифицирования при этом значительно повышается, но в связи с тем, что полимеры относительно легкие, технология обработки нестабильная. Поэтому в качестве наполнителя при разработке процесса нами был выбран более тяжелый материал – порошок железа с размером фракции 0,25–0,5 мм. Данный порошок получали путем дробления дроби и дальнейшей ее классификации на фракции воздушным способом. После получения необходимой фракции порошок обрабатывали специальным составом и в кипящем слое смешивали с «нанопорошками». В процессе обработки происходило налипание «наночастиц» на включения железа, что давало возможность обрабатывать расплав.

В лабораторных условиях были проведены испытания по эффективности модифицирования присадками с «наночастицами», входящими в полимеры, и «склеенными» с частицами железа. Плавку проводили в индукционной печи емкостью 50 кг. Выплавляли сталь, химический состав которой соответствовал стали 20X17H24C2Л. В качестве критерия оценки эффективности модифицирования определяли механические свойства стали, для чего заливали стандартные образцы в виде трешки. Модифицирующие присадки вводили в ковш «сэндвич-процессом». Величины присадок рассчитывали исходя из процентного содержания в них «наночастиц». Для оценки влияния их размера на эффективность модифицирования применяли различные металлические фракции размером 200–300, 400–500 мкм и 1 мм.

Сравнительный анализ по модифицирующей обработке различными присадками показал, что наиболее эффективное действие оказывает композиция с использованием фракции 400–500 мкм. Увеличение количества присадки с использованием металлической фракции 400–500 мкм позволяет получать более высокие свойства (рис. 2).

Уровень свойств при вводе присадки на основе фракции размером 400–500 мкм по сравнению с исходным вариантом повышается на 25–30%. В то же время применение присадок, приготовленных на основе полимеров, повысило свойства на 20–25% (рис. 3).

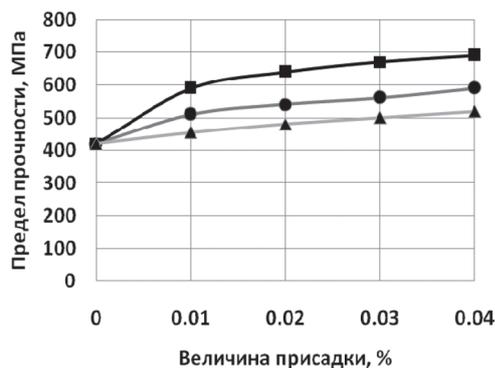


Рис. 2. Влияние величины присадки на предел прочности для различных металлических фракций: ● – 200–300 мкм; ■ – 400–500 мкм; ▲ – 0,5–1,0 мм

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование металлической фракции для приготовления модифицирующей композиции и осуществления обработки «сэндвич-процессом» позволяет повысить усвоение наночастиц и получить высокий уровень свойств жаропрочных хромоникелевых сталей. Разработанный состав модификатора может также эффективно вводиться в расплав при закатке его в проволоку и подачей через трайб-аппарат или путем вдувания в струю при разливке металла.

### Выводы

Теоретические и практические данные исследований показывают, что эффект модифицирования может значительно снижаться при недостаточной степени предварительного раскисления и десульфурации металла, что требует увеличенного расхода модификатора и приводит к нестабильности свойств готового металла. Анализ технологий модифицирования показал, что максимальная эффективность достигается при вводе присадок методами, позволяющими равномерно распределить

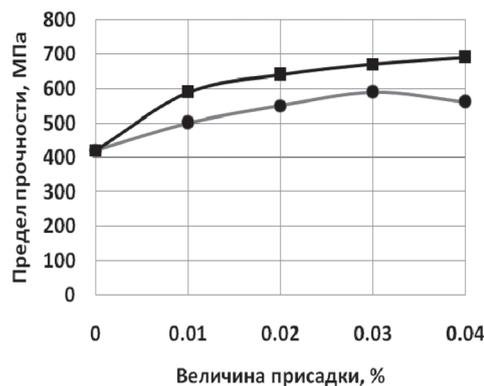


Рис. 3. Влияние величины присадки модифицирующих композиций

их по объему металла и обеспечить минимальный угар в атмосфере воздуха.

Наибольший эффект от модифицирования можно получить при обработке металла последовательно различными модификаторами, изменяя при этом конкретные характеристики. Для жаропрочных сталей на первой ступени целесообразно проводить модифицирующую обработку карбонатами ЩЗМ, направленную в основном на рафинирование расплава, уменьшение количества, формы и размера неметаллических включений. Для изменения формы дендритов аустенита целесообразно проводить обработку «наночастицами». Наиболее высокая эффективность при обработке «наночастицами» достигается по технологии с использованием композиции, включающей несущую металлическую фракцию размером 400–500 мкм. Обработку расплавов композициями, содержащими металлическую фракцию с «наночастицами», можно проводить различными методами, включая «сэндвич-процесс», вдувание в струю металла и использование трайб-аппаратов.

### Литература

1. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах М., 1971.
2. Гуревич Ю. Г. Взаимодействие титана с азотом и углеродом в жидкой стали // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1960. № 6. С. 59–67.
3. Малиночка Я. Н., Близнякова Л. А., Балакина Л. А. и др. О влиянии инокуляторов на кристаллизацию и структуру стального слитка // Проблемы стального слитка. М., Т. 7. 1978, С. 47–49.
4. Крещановский Н. С., Хенкин М. Л., Земмеринг М. Н. Пути повышения механических свойств стального литья // Термическая обработка и свойства литой стали. М., 1955. С. 88–116.
5. Бабаскин Ю. З. Структура и свойства литой стали. Киев, 1980.
6. Юнаков В. Н., Тужиков В. Ф., Шереметьев В. А. и др. Взаимосвязь процессов формирования слитка с загрязненностью металла неметаллическими включениями в условиях переплавных процессов // Теория металлургических процессов. М., 1972. Вып. 1. С. 170–190.
7. Ершов Г. С., Черняков В. А. Строение и свойства жидких и твердых металлов М., 1978.
8. Бежок А. П., Задрецкий С. П., Корнеев С. В. и др. Применение барий-стронциевых карбонатов для обработки жаропрочных сталей // Литье и металлургия. 2011. № 3. Спецвыпуск. С. 109–114.