

УДК 669

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕПЕЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КАЧЕСТВО ТЯЖЕЛЫХ КОРПУСНЫХ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

*Чернышов Е.А., д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии
и оборудование» (nil_st@nntu.ru)*

Романов А.Д., инженер

Романова Е.А., аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603022, Россия, Н.Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. Рассмотрены способы повышения плотности и однородности строения литых заготовок ответственного назначения из высокопрочных легированных сталей. Показано, что только легирование не всегда обеспечивает необходимые механические и служебные свойства ответственных изделий, получаемых способом литья. Отмечается, что наиболее распространенный способ литья в песчаные формы не позволяет воздействовать на затвердевающий металл, а, следовательно, на структуру и свойства литого металла и возникающие при этом характерные трудно устранимые дефекты. Приведены основные технологические параметры литья в тонкостенные формы: толщина облицовочного слоя и металлической оснастки, способ подвода металла, технологические параметры заливаемого металла, способ создания направленного затвердевания отливки, а также количество и материал микрохолодильников. Приведены результаты исследования влияния внепечного воздействия на затвердевающий металл тяжелых корпусных отливок из специальной среднелегированной стали. Проанализировано качество металла отливок, полученных по следующим вариантам: суспензионной заливкой жидкого металла в металлооболочковую форму с принудительным охлаждением (комплексное воздействие), в металлооболочковую форму с принудительным охлаждением (внешнее воздействие), в объемную песчаную форму. Исследование макроструктуры показало, что наиболее крупное зерно получается в объемной песчаной форме, в центральной зоне отливки наблюдается усадочная пористость. Увеличение скорости кристаллизации и затвердевания приводит к измельчению структуры и повышению плотности металла по высоте и сечению отливки. Условия затвердевания влияют и на морфологию неметаллических включений и характер дендритной структуры. Отмеченные преимущества особенно заметны при комплексном воздействии на затвердевающую отливку. При этом происходит более резкое снижение температуры перегрева при вводе микрохолодильников и принудительном охлаждении тонкостенной формы, а также увеличение центров кристаллизации и повышение эффекта суспензионного питания на завершающей стадии затвердевания. Механические свойства стальных отливок, полученных с комплексным воздействием, особенно ударная вязкость и пластичность, значительно выше, чем у отливки, полученной в объемной песчаной форме. Повышение механических свойств объясняется ускоренным теплоотводом, измельчением структуры и повышением плотности металла отливки, а также более благоприятным распределением неметаллических включений. Не менее важным преимуществом разработанной технологии является повышение технологического выхода годного за счет снижения расхода металла на прибыли, повышение чистоты поверхности отливки и возможности отнесения этого способа в разряд малоотходных и ресурсосберегающих.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, внепечное воздействие, отливка, тонкостенная форма, микрохолодильники, физико-механические свойства, структура, карбиды, литейные дефекты, кристаллизация, неметаллические включения, качество металла.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-223-229

В современном судостроении, судовой энергетике и энергомашиностроении для изделий ответственного назначения, работающих в сложных условиях, широко применяются легированные высокопрочные стали. В работах [1 – 5] показано, что оптимальный комплекс свойств высокопрочной стали достигается при совместном легировании стали хромом, никелем и молибденом с модифицирующими добавками ванадия, ниобия и алюминия. В тоже время отмечается, что возможности повышения служебных и механических свойств конструкционных сталей только за счет легирования практически исчерпаны и в настоящее время этот путь экономически не целесообразен [6 – 10]. Кроме того, учитывая необходимость обеспечения свариваемости,

максимальное содержание углерода в сталях, применяемых для конструкций, работающих при низких температурах, не должно превышать 0,10 – 0,12 %, а содержание легирующих элементов должно быть минимальным [1, 3, 4, 11 – 13].

Литые изделия из легированных сталей, как правило, сочетают высокую прочность и ударную вязкость и подвергаются тщательному контролю их качества [6]. При этом качество литой заготовки определяется механическими и служебными свойствами, которые в свою очередь зависят от плотности и однородности структуры металла.

Известно, что формирование структуры и свойств отливок происходит в результате сложной совокупности

различных физико-химических процессов, протекающих в основном при кристаллизации и затвердевании. Зарождение и рост кристаллов, их преимущественная ориентировка, морфология неметаллических включений в значительной степени определяются условиями и возможностью управления этими процессами.

В ходе затвердевания возникает большинство дефектов, присущих традиционному способу литья в объемной форме: усадочные и газовые раковины и пористость, различные виды ликвации, неметаллические включения, макро- и микротрещины. В итоге снижается качество литых заготовок и уровень физико-механических свойств литого металла.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что способы получения высококачественных литых стальных заготовок можно разделить на две группы. Первая группа – это рафинировочные процессы, вторая – способы, связанные с воздействием на кристаллизацию и затвердевание выплавленной стали (в том числе и в открытых печах). Лучшие результаты получают при использовании дополнительных рафинировочных переплавов: вакуумно-дуговой, электрошлаковый, электронно-лучевой и др. Положительной стороной этих способов является исключение вредных примесей, попадающих в жидкую сталь из футеровки печи и окружающей атмосферы, повышение плотности и однородности строения литых заготовок, резкое снижение (или полное устранение) усадочной раковины. Однако использование этих способов связано с высокими капитальными затратами, повышенным вниманием к вопросам техники безопасности. Кроме того, им присущи жесткая связь процесса плавления расходуемой заготовки (электрода) и нагреваемой жидкой ванны формирующегося слитка, низкая производительность, высокая себестоимость готовых изделий. Использование водоохлаждаемого кристаллизатора создает дополнительные трудности для получения фасонных отливок [7 – 9].

Устранить эти недостатки и в тоже время получать фасонные отливки высокого качества возможно с помощью способов второй группы, внепечной обработки, которые позволяют интенсифицировать процесс кристаллизации и затвердевание формирующейся отливки, активно управлять этими процессами.

Одним из вариантов решения этой проблемы является ускоренный теплоотвод от затвердевающей отливки с помощью принудительного охлаждения тонкостенной металлооболочковой формы. При этом толщина облицовочного слоя должна быть такой, чтобы обеспечивать возможность воздействия на процесс затвердевания отливки. Для усиления эффекта ускорения затвердевания наружную поверхность фасонной опоки охлаждают водовоздушной смесью. Ускоренное охлаждение приводит к сокращению продолжительности затвердевания и ширины двухфазной зоны, а также повышению механических свойств [10, 11].

Однако возможности внешнего воздействия на процесс затвердевания ограничены, так как с нарастанием толщины затвердевшей корки ее тепловое сопротивление начинает лимитировать теплоотдачу от кристаллизующегося расплава. Следовательно, с увеличением толщины отливки эффективность тонкостенных металлооболочковых форм снижается. На толстостенных отливках только изменением теплоотвода устранить усадочные и ликвационные дефекты не всегда удается [12].

Для получения однородной структуры слитков и крупных отливок с высокими механическими свойствами литого металла в металлургии известен другой способ интенсифицирования процесса затвердевания за счет внутреннего теплоотвода от кристаллизующегося металла с помощью суспензионной заливки.

Суспензионная заливка с использованием дисперсных микрохолодильников, являясь внутренним воздействием, оказывает влияние на процесс затвердевания, повышает плотность, однородность и свойства литого металла. Вводимые в жидкий расплав микрохолодильники, являясь дополнительными центрами кристаллизации, интенсифицируют процесс снятия начального перегрева жидкой стали, оказывают влияние на ширину структурных зон, ликвационные процессы и продолжительность затвердевания слитков и массивных отливок [11 – 13].

На количество образующихся в расплаве центров кристаллизации влияют процессы физико-химического и теплофизического взаимодействия дисперсных частиц с окружающим расплавом стали в условиях их быстрого нагрева от начальной температуры (20 °С) до температуры солидуса и последующего плавления гранул в интервале температур солидус – ликвидус.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния комплексного воздействия (ввод микрохолодильников в сочетании с принудительным охлаждением металлооболочковой формы) на структуру и свойства тяжелых корпусных отливок из специальной среднелегированной стали.

Общая масса заливаемого в форму металла составляла 8 т. Отливка представляла собой полый цилиндр с двумя наружными приливами – патрубками. По высоте стенка имела формовочный уклон – внизу толщина стенки 160 мм, вверху 180 мм. На отливку устанавливали шесть открытых приливов. Металл плавил в электродуговой печи с основной футеровкой, раскисление жидкой стали в ковше проводили FeSe и Al. Подвод металла осуществляли через вертикальный целевой питатель, выполненный из шамотных кирпичей и стандартных литниковых трубок, металл заливали из стопорного ковша. По заполнению примерно 1/3 высоты приливы заливку через литниковую систему прекращали и проводили доливку жидкого металла сверху через открытую прилив. Температуру жидкой стали замеряли термпарой погружения ВР 20/5. Температу-

ра заливаемого металла составляла 1580 °С. После заливки жидким металлом металлооболочковую форму, исключая прибыль, подвергали охлаждению водовоздушной смесью.

Для сравнения оценки эффекта комплексного воздействия были получены отливки в тонкостенную металлооболочковую форму с принудительным охлаждением в такую же форму с вводом микрохолодильников и в объемную песчаную жидкостекольную форму (контрольная отливка).

Для указанной отливки была разработана и изготовлена, с учетом расчета на прочность, специальная оснастка из листовой стали толщиной 5 мм. Металлическая оснастка лишь приблизительно повторяет конфигурацию модели и изготовлена таким образом, чтобы между моделью и металлической оснасткой оставался требуемый зазор, в который заливается жидкая самотвердеющая керамическая смесь (по Шоу-процессу).

Для создания направленного затвердевания толщина облицовочного слоя была дифференцирована по высоте металлооболочковой формы: в нижней части 10 – 12 мм, в верхней части 25 – 30 мм, толщина облицовочного слоя прибылей 60 – 65 мм. При этом прибыль облицовывали пластичной жидкостекольной смесью. Отверстие в патрубке выполняли металлообо-

лочковым стержнем с толщиной облицовочного слоя из керамической смеси 20 мм.

Учитывая конфигурацию отливки (полый цилиндр) с внутренним диаметром 1530 мм, для обеспечения свободной усадки металлическую оснастку со стороны внутренней поверхности выполняли из отдельных секций (4 шт) с зазором между ними. Величину зазоров с учетом величины усадки отливки определяли расчетом. Отдельные секции по вертикали соединяли гибкими металлическими уголками. Такая конструкция оснастки выполняла роль внутреннего податливого стержня. После затвердевания керамической смеси, облицовочный слой металлооболочковой формы прокалывали газовой горелкой и красили противопопригарным покрытием на основе циркона.

Для ускорения процесса затвердевания отливки в металлооболочковой форме разработано специальное устройство принудительного охлаждения водовоздушной смесью.

При комплексном воздействии вводили 2 % микрохолодильников (железный порошок марки ПЖВ 1.450.26 ГОСТ 9849-86 или готовую стальную дробь, используемую с цехе для собственных нужд с добавкой 0,1 % силикокальция).

Характер макроструктуры с изменением условий затвердевания приведен на рис. 1.

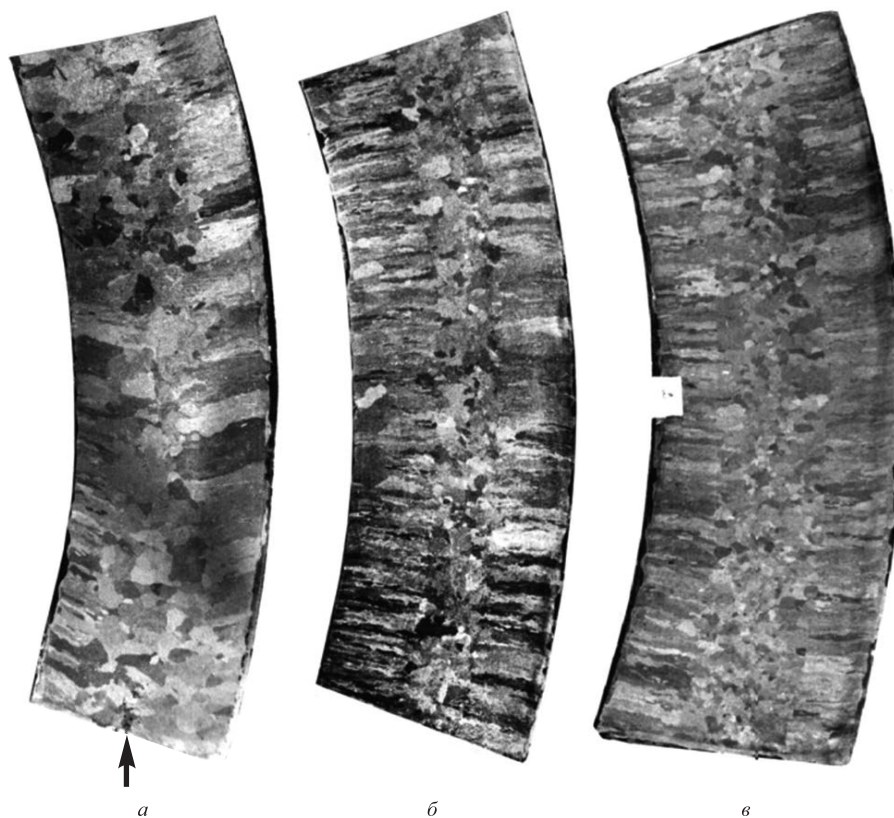


Рис. 1. Макроструктура отливки:

a – объемная форма; *б* – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; *в* – то же с вводом микрохолодильников

Fig. 1. Casting macrostructure:

a – volume form; *b* – metalshell form with compulsory cooling; *v* – the same with input of microrefrigerators

Исследование макроструктуры показало, что наиболее крупнозернистое строение наблюдается у отливки, полученной в объемной форме (рис. 1, *а*), а в центральной зоне имеется осевая пористость (показано стрелкой). В результате интенсивного теплоотвода от тонкостенной металлооболочковой формы происходит сокращение двухфазной зоны и ускорение процесса затвердевания. Как следствие этого, на темплете видна плотная зона столбчатых кристаллов с небольшой зоной мелких равноосных кристаллов в центре отливки (рис. 1, *б*). При комплексном воздействии микрохолодильников, являясь дополнительными центрами кристаллизации, сокращают протяженность столбчатой зоны и способствуют получению мелкозернистой структуры. Кроме того, вводимые дисперсные частицы за счет снижения перегрева и объемной усадки металла способствуют повышению плотности структуры (рис. 1, *в*).

Исследования показали, что микроструктура исследуемой стали представляет собой сорбитизированный бейнит. Такая структура наблюдается на всех отливках, независимо от условий затвердевания. Однако при принудительном охлаждении и комплексном воздействии на затвердевающий расплав микроструктура более дисперсная по сравнению с контрольным металлом. Это особенно заметно при исследовании субзеренной структуры. У контрольного металла субзерно наиболее крупное, особенно в центре отливки. Увеличение скорости кристаллизации путем принудительного охлаждения приводит к измельчению структуры. При комплексном воздействии на затвердевающий расплав наблюдается наиболее мелкое и однородное по сечению субзерно, т. е. размеры субзерен находятся в прямой зависимости от условий затвердевания.

Характер расположения карбидов меняется в зависимости от способа получения отливок. Увеличение скорости кристаллизации отливки при комплексном воздействии приводит к более равномерному их распределению при одновременном измельчении более чем в 5 раз (рис. 2). Для металла, полученного в объемной форме, размер частиц составляет приблизительно

$5 \cdot 10^{-6}$ см, для металла с добавкой микрохолодильников значительно меньше – 10^{-6} см.

Условия кристаллизации по-разному влияют на каждый из видов неметаллических включений. На количество, размеры и расположение сульфидных включений оказывает влияние скорость затвердевания. При этом количество и размеры сульфидов возрастают от периферии к центру отливки, наиболее сильно увеличиваясь у отливки, полученной в объемной форме. В центральных частях они расположены в виде пленок по границам зерен. При принудительном охлаждении они расположены более равномерно по всему сечению и находятся в виде более тонких и прерывистых пленок. При комплексном воздействии образуются окиссульфиды, расположенные, в основном, внутри зерна в компактной форме. Количество силикатных включений и их размеры практически не меняются по сечению отливки и не зависят от скорости кристаллизации.

На рис. 3 приведено изменение скорости кристаллизации v по сечению L , на рис. 4 – плотности γ по высоте H отливки.

Видно, что скорость кристаллизации в условиях ускоренного затвердевания и суспензионной разливки увеличивается, особенно в центральной зоне. Снижение температуры расплава способствует более интенсивной кристаллизации из-за уменьшения критических размеров зародышей кристаллов, которые, вследствие большого температурного градиента в расплаве, имеют большую линейную скорость роста.

Наблюдаемая интенсификация процесса кристаллизации при комплексном воздействии происходит за счет более резкого снижения температуры перегрева при вводе микрохолодильников и принудительного охлаждения металлооболочковой формы, что приводит к увеличению числа центров кристаллизации. Кроме того, нерасплавившиеся частицы могут служить в расплаве второй фазой, являясь готовыми зародышами или подложками при кристаллизации. Ввод микрохолодильников приводит к увеличению числа центров кристаллизации, а, следовательно, увеличению скорости

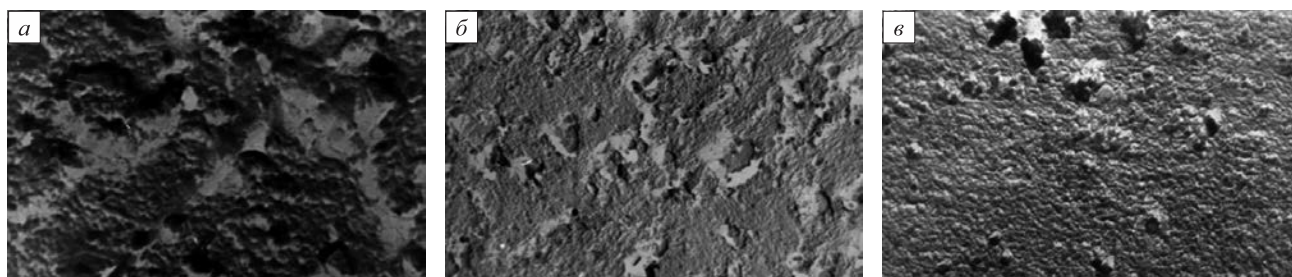


Рис. 2. Распределение карбидов:
а – объемная форма; *б* – металлооболочковая форма; *в* – то же с вводом микрохолодильников, $\times 10\,000$

Fig. 2. Distribution of carbides ($\times 10,000$):
a – volume form; *b* – metalshell form with compulsory cooling; *v* – the same with input of microrefrigerators

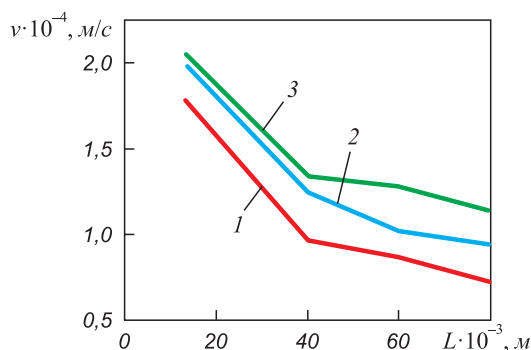


Рис. 3. Изменение скорости кристаллизации по сечению отливок: 1 – объемная форма; 2 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; 3 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников

Fig. 3. Change of speed of crystallization along the section of castings: 1 – volume form; 2 – metalshell form with compulsory cooling; 3 – the same with input of microrefrigerators

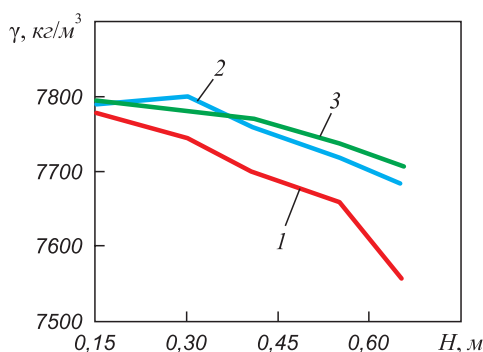


Рис. 4. Распределение плотности по высоте отливки: 1 – объемная форма; 2 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; 3 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников

Fig. 4. Distribution of firmness along the casting height: 1 – volume form; 2 – metalshell form with compulsory cooling; 3 – the same with input of microrefrigerators

кристаллизации. Особенно заметно это проявляется в осевой зоне отливки.

Сравнение дендритной структуры отливок, полученных по трем вышеуказанным вариантам, показало, что протяженность зоны замороженных дендритов не изменяется. Характер структуры зоны столбчатых дендритов во всех случаях примерно одинаков, разница заключается в глубине столбчатых дендритов и их ширине, что соответствует макроструктуре отливок. В то же время в центральных зонах отливки с равноосными кристаллами характер дендритной структуры отличается в зависимости от технологии получения отливки. Самая мелкая дендритная структура получена при комплексном воздействии на затвердевающий металл. При отсутствии воздействия дендритное строение сохраняется, но размеры дендритов значительно больше.

Плотность литой стали γ по высоте отливки H изучали методом гидростатического взвешивания образ-

цов, вырезанных из центральных зон отливок.

Повышение плотности металла при комплексном воздействии можно объяснить следующими причинами. При комплексном воздействии на затвердевающий расплав ввод микрохолодильников, снимая теплоту перегрева (частично или полностью), уменьшает объем усадки в жидком состоянии. Расширение вводимых частиц при нагреве и плавлении также частично компенсирует усадку. Измельчение структуры увеличивает эффект суспензионного питания [11, 14]. Все это, в сочетании с преимуществами металлооболочковых форм, повышает плотность литого металла.

На рис. 5 приведена схема вырезки образцов из отливки. Данные механических свойств центральных зон прибыльной части отливки приведены в таблице.

Механические свойства металла отливок определяли на термообработанных образцах по следующему режиму: ступенчатый гомогенизирующий отжиг при 1080 °С, закалка от 950 °С и отпуск при температуре 650 °С.

Из таблицы видно, что механические свойства образцов, вырезанных из отливок, залитых с комплексным воздействием, значительно выше, чем у отливки, полученной по традиционной технологии, особенно пластические свойства и ударная вязкость. Повышение механических свойств отливок можно объяснить ускоренной кристаллизацией, измельчением структуры и более благоприятным распределением неметаллических включений. При этом получено самое высокое сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости.

Выводы. Исследование качества исследуемой стали, подвергнутой комплексному воздействию, показало, что при таком способе возрастает структурная и физическая однородность, изотропность механических свойств, снижается глубина усадочной раковины и расход металла на прибыли. Не менее важным плюсом

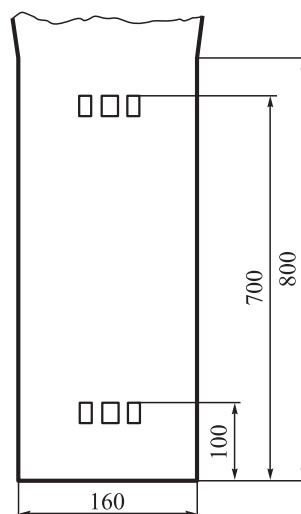


Рис. 5. Схема вырезки образцов для механических испытаний

Fig. 5. The scheme of samples cutting for mechanical tests

Механические свойства*

Mechanical properties

Вариант заливки	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
С принудительным внешним охлаждением и вводом микрохолодильников	<u>755,0</u>	<u>713,0</u>	<u>18,5</u>	<u>68,0</u>	<u>1,80</u>
	767,0	723,0	19,0	69,0	1,88
С принудительным внешним охлаждением	<u>780,0</u>	<u>740,0</u>	<u>17,5</u>	<u>65,3</u>	<u>1,67</u>
	800,0	753,0	18,0	67,0	1,70
В объемную форму	<u>686,0</u>	<u>590,0</u>	<u>10,5</u>	<u>41,3</u>	<u>1,20</u>
	745,0	630,0	14,1	51,0	1,50

* В числителе указаны механические свойства образцов, вырезанных из подприбыльной верхней части, в знаменателе – из нижней части отливки.

разработанной технологии является повышение чистоты поверхности отливки и, как следствие отмеченных преимуществ, обеспечивается надежность и работоспособность изделий.

Ввод микрохолодильников в жидкий расплав является эффективным целенаправленным методом управления качеством фасонных отливок из стали. С помощью этого способа можно успешно осуществлять объемное и локальное модифицирование и легирование металла. Использование в качестве микрохолодильников стружки, высечки, частиц металлической фракции металлургических и энергетических шлаков делает этот способ ресурсосберегающим и малоотходным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Higher-strength steel weldments for submarine hulls – second status report. Applied Research laboratory United States Steel. 1965. – 51 p.
- High performance steel and titanium castings. National materials advisory board. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering. Report NMAV-296. 1973. – 155 p.
- Holmquist T.J. Strength and fracture characteristics of HY-80, HY-100 and HY -130 steels subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Armament Systems Division, 1987. – 64 p.
- Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.Д. Судостроительные стали серии НУ// Черные металлы. 2014. № 8. С. 27 – 31.
- Горынин И.В. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопросы материаловедения. 2008. № 2. С. 7 – 11.
- Крылов В.В. О проектировании корпусов многоцелевых подводных лодок из высокопрочных сталей и титановых сплавов // Судостроение. 2006. № 1. С. 47 – 52.
- Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.Д. Развитие металлургических технологий производства и получения ответственных изделий из высокопрочных судостроительных сталей // Черные металлы. 2015. № 3. С. 33 – 37.

- Base materials for critical application: requirements for low alloy steel plate, forgings, castings, shapes, bars and heads of HY-80/100/130 and HSLA 80/100. U.S. Navy, Naval Sea Systems Command, NAVSEA 2012. – 228 p.
- Wilson Alexander D. Production experience with new heavy plate grades for bridge and shipbuilding using microalloying. AIST Conference on Micro Alloyed Steels. July 2007. p. 47 – 58.
- Advances in low carbon, high strength ferrous alloys. Naval Surface Warfare Center, Ship Materials Engineering Department Research and Development Report, Bethesda, Md. 1993. – 48 p.
- Porter L.F., Rathbone A.M., Rolfe S.T., Dorsch K.E. Fourth quarterly progress report: development of an HY-130/150 weldment. Applied Research Laboratory United States Steel. 1964. – 44 p.
- Boyce B.L., Crenshaw T.B., Dilmore M.F. The strain-rate sensitivity of high-strength high-toughness steels. Sandia National Laboratories. 2007. – 22 p.
- Орыщенко А.С., Голосиенко С.А. Новое поколение высокопрочных судостроительных корпусных сталей // Судостроение. 2013. № 4. С. 73 – 76.
- Производство отливок для энергомашиностроения / Под ред. И.Н. Примака и А.А. Бречко. – Л.: Машиностроение, 1977. – 256 с.
- Гуляев А.П. Чистая сталь. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
- Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов, А.И. Строганов, Ю.Д. Смирнов, Б.П. Охримович. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
- Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 762 с.
- Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
- Рыжиков А.А., Рошин М.И., Фокин В.И. Совершенствование технологии стального литья. – М.: Машиностроение, 1977. – 143 с.
- Чернышов Е.А. Исследование двухфазной зоны стальных отливок, формирующихся в тонкостенных металлооболочковых формах // Литейное производство. 2003. № 11. С. 17 – 19.
- Затуловский С.С. Суспензионная заливка. – Киев: Наукова думка, 1981. – 260 с.
- Тимофеев Г.И. Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.

Поступила 23 июля 2015 г.

COMPARATIVE ANALYSIS AND EFFICIENCY ASSESSMENT OF COMPLEX IMPACT ON QUALITY OF HEAVY CASE CASTINGS OF MEDIUM-ALLOYED HIGH-STRENGTH STEEL

E.A. Chernyshov, A.D. Romanov, E.A. Romanova

Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Methods of increase in firmness and uniformity of the structure of cast blanks of responsible appointment from high-strength alloyed steels are briefly considered. It is shown that only alloying not always provides necessary mechanical and office properties of the responsible products received by casting. It is noted that the most widespread mode of casting in sandy forms doesn't allow to effect on hardening and consequently on the structure and properties of cast metal and characteristic hardly removable defects, arising at the same time. The critical technological parameters of casting are specified to thin-walled forms: thickness of a facing layer and the metal equipment, metal supply mode, technological parameters of the filled-in metal, mode of creation of the directed casting hardening, and also quantity and material of micro-refrigerators. The researched results of influence of ladle impact on the hardening metal of heavy case castings of special steel are given. Quality of metal of the castings received by the following options is analyzed: suspension priming of liquid metal in a metalshell form with compulsory cooling (complex influence), in a metalshell form with compulsory cooling (external influence), in a volume sandy form. Probe of a macrostructure showed that the largest grain turns out in a volume sandy form; in the central area of casting the shrinkable porosity is observed. Increase in speed of crystallization and hardening of casting leads to structure crushing and increase in firmness of metal along the height and section of casting. Conditions of hardening influence also on morphology of nonmetallic inclusions and on the nature of dendrite structure. Noted advantages are especially noticeable at complex impact on the hardening casting. At the same time there is sharper drop of overheat temperature at the input of microrefrigerators and compulsory cooling of a thin-walled form and increase in the centers of crystallization and in effect of suspension supply at closing stage of hardening. Mechanical properties of the steel castings, received with complex influence, especially impact strength and plasticity, are much higher than at the casting received in a volume sandy form. Increase in mechanical properties is explained by the accelerated heat sink, structure crushing and increase in firmness of casting metal and more favorable distribution of nonmetallic inclusions. Not less important advantages of the developed technology are increase in metal yield through the metal consumption, increase in surface smoothness of casting and a possibility of reference of this mode in the low-waste and resource-saving category.

Keywords: high-strength steel, ladle influence, casting, thin-walled form, microrefrigerators, physicomechanical properties, structure, carbides, foundry defects, crystallization, nonmetallic inclusions, quality of metal.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-223-229

REFERENCES

- Higher-strength steel weldments for submarine hulls – second status report. *Applied Research Laboratory United States Steel*. 1965, 51 p.
- High performance steel and titanium castings*. National materials advisory board. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering. Report NMAB-296. 1973, 155 p.
- Holmquist T.J. *Strength and fracture characteristics of HY-80, HY-100, and HY-130 steels subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures*. Armament Systems Division, 1987, 64 p.
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.D. Shipbuilding HY steels. *Chernye metally*. 2014, no. 8, pp. 27–31. (In Russ.).
- Gorynin I.V. Sparingly alloyed steel with the nanomodified structure for operation in extreme conditions. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, no. 2, pp. 7–11. (In Russ.).
- Krylov V.V. Design of cases of multi-purpose submarines from high-strength steel and titanic alloys. *Sudostroenie*. 2006, no. 1, pp. 47–52. (In Russ.).
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.D. Development of metallurgical production technologies and receiving of responsible products from high-strength shipbuilding steel. *Chernye metally*. 2015, no. 3, pp. 33–37. (In Russ.).
- Base materials for critical application: requirements for low alloy steel plate, forgings, castings, shapes, bars and heads of HY 80/100/130 and HSLA 80/100*. U.S. Navy, Naval Sea Systems Command, NAVSEA 2012, 228 p.
- Wilson Alexander D. Production experience with new heavy plate grades for bridge and shipbuilding using microalloying. *AIST Conference on Micro Alloyed Steels*. July 2007, pp. 47–58.
- Advances in low carbon, high strength ferrous alloys*. Naval Surface Warfare Center, Ship Materials Engineering Department Research and Development Report, Bethesda, Md. 1993, 48 p.
- Porter L.F., Rathbone A.M., Rolfe S.T., Dorsch K.E. Fourth quarterly progress report: development of an HY-130/150 weldment. *Applied Research Laboratory United States Steel*. 1964, 44 p.
- Boyce B.L., Crenshaw T.B., Dilmore M.F. The strain-rate sensitivity of high-strength high-toughness steels. *Sandia National Laboratories*, 2007, 22 p.
- Oryshchenko A.S., Golosienko S.A. New generation high-strength ship-building case steel. *Sudostroenie*. 2013, no. 4, pp. 73–76. (In Russ.).
- Proizvodstvo otlivok dlya energomashinostroeniya* [Production of castings for power plant engineering]. Primak I.N., Brechko A.A. eds. Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 256 p. (In Russ.).
- Gulyaev A.P. *Chistaya stal'* [Pure steel]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p. (In Russ.).
- Kolosov M.I., Stroganov A.I., Smirnov Yu.D., Okhrimovich B.P. *Kachestvo slitki spokoinoi stali* [Quality of an ingot of dead-melted steel]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 408 p. (In Russ.).
- Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General metallurgy]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2002, 762 p. (In Russ.).
- Efimov V.A. *Razlivka i kristallizatsiya stali* [Pouring and crystallization became]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 552 p. (In Russ.).
- Ryzhikov A.A., Roshchin M.I., Fokin V.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii stal' nogo lit'ya* [Improvement of steel casting technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 143 p. (In Russ.).
- Chernyshov E.A. Research of the two-phase zone of the steel castings which are formed in thin-walled metalshell forms. *Liteinoe proizvodstvo*. 2003, no. 11, pp. 17–19. (In Russ.).
- Zatulovskii S.S. *Suspenzionnaya zalivka* [Suspension priming]. Kiev: Naukova dumka, 1981, 260 p. (In Russ.).
- Timofeev G.I. *Mekhanika splavov pri kristallizatsii slitkov i otlivok* [Mechanics of alloys at crystallization of ingots and castings]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 160 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.A. Chernyshov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment" (nil_st@nntu.ru)

A.D. Romanov, Engineer

E.A. Romanova, Postgraduate

Received July 23, 2015