

УДК 669.18

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ОТЛИВОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКОЙ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙСЯ СТАЛИ

*Чернышов Е.А.¹, д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование»
Баев И.В.², заместитель директора по спецтехнике
Романов А.Д.¹, инженер (nil_st@nntu.ru)*

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603022, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

² ПАО «Завод «Красное Сормово»
(603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Баррикад, 1)

Аннотация. В работе приведены исследования по влиянию внешнего воздействия при заливке высокопрочной легированной стали в тонкостенные металлооболочковые формы с внешним охлаждением и в такие же формы с суспензионной заливкой – комплексное воздействие на затвердевающую отливку. Рассматриваются предпосылки для выбора данных технологий. В качестве контрольного металла исследовали отливку, полученную в объемной жидкостекольной форме. Исследовали макроструктуру, излом и механические свойства металла при нормальной (+20 °С) и повышенной (+350 °С) температурах. Наиболее плотная и однородная структура и излом получены у отливки при комплексном воздействии. Установлено, что главное преимущество предлагаемых технологий – повышение однородности механических свойств по сечению и высоте отливки, особенно пластических свойств и ударной вязкости. Анизотропия свойств по сечению и высоте опытных отливок значительно меньше, чем в контрольной отливке. В результате проведенных исследований установлено, что внешнее и комплексное воздействие на формирующуюся отливку позволяет повысить ее механические свойства при различных температурах испытания образцов. У отливки, полученной в металлооболочковой форме с принудительным охлаждением, не наблюдается заметной разницы в механических свойствах как по ее высоте, так и по сечению. При этом прочностные свойства в среднем на 100 МПа выше, чем у контрольной отливки, при сохранении высоких значений пластичности и ударной вязкости.

Ключевые слова: сталь, механические свойства, излом, структура, кристаллизация, суспензионная заливка, отливка, неметаллические включения, металлооболочковая форма, объемная форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-644-650

ВВЕДЕНИЕ

Создание материалов для корпусных конструкций и энергетических установок сопряжено с решением целого ряда технических проблем, связанных с экстремальными условиями работы материалов [1 – 6]. В судостроении и энергомашиностроении широко применяются высокопрочные низкоуглеродистые легированные стали. Получение таких сталей традиционными металлургическими методами, только за счет легирования, практически невозможно [7 – 12]. В настоящее время как в мировой, так и в отечественной практике обеспечение высокого металлургического качества стали решается в процессе внепечной обработки жидкого металлического полуфабриката, выплавленного в любом сталеплавильном агрегате. Применение внепечной обработки металла с точки зрения резкого снижения содержания вредных примесей, газов, неметаллических включений, модифицирования и изменения морфологии последних, а также защиты жидкого металла от вторичного окисления в процессе разлива [7, 8, 11, 13 – 16] позволяет получить стальные изделия с высоким уровнем пластичности и ударной вязкости. При

этом считается, что весь комплекс механических характеристик (прочность, пластичность, ударная вязкость и др.) литого металла значительно уступает металлу, подвергнутому термомеханической обработке.

Проблема повышения качества литых заготовок, плотных и однородных по всему объему, несмотря на большие успехи в литейном производстве полностью не решена и остается актуальной на современном этапе развития отечественной техники и металлургии. Это особенно важно вследствие развития специальных отраслей машиностроения, в которых все шире используются литые заготовки из сложнолегированных сталей. Поэтому широко применяются различные способы внешнего воздействия на кристаллизующуюся отливку. В работах [17 – 20] показано положительное влияние инокуляторов на механические и служебные свойства отливок.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование структуры и комплекса механических свойств металла крупных фасонных отливок из Cr–Ni–Mo–V стали,

полученных по различным технологиям. В процессе формирования отливки подвергали внешнему и комплексному воздействию на процесс кристаллизации и затвердевания. Внешнее воздействие заключалось в том, что отливки получали в тонкостенных металлооболочковых формах (ТМОФ) с внешним водовоздушным охлаждением и дифференцированным по высоте облицовочным слоем из огнеупорной смеси. При комплексном воздействии отливки получали в таких же условиях с одновременным вводом в струю жидкого металла при заливке 2 % дисперсных твердых частиц, т. е. осуществляли суспензионную заливку (ТМОФ СЗ). Для сравнения такие же отливки получали в объемную жидкостекольную форму по традиционной технологии, т. е. без какого-либо воздействия на формирующуюся отливку (контрольный вариант).

Предпосылкой для выбора данных технологий послужили предварительные исследования и литературные данные, которые показали следующее: интенсивное охлаждение жидкого металла отливок в металлооболочковой форме способствует развитию последовательной кристаллизации, изменению структуры и повышению плотности и механических свойств металла. Однако возможности влияния внешнего охлаждения на процесс затвердевания ограничены, так как с нарастанием толщины затвердевающей корки ее тепловое сопротивление начинает лимитировать теплоотдачу от кристаллизующегося расплава. В этом случае использование только внешнего охлаждения металлооболочковой формы становится неэффективным.

Известно, что при суспензионной заливке вводимые твердые порошкообразные частицы (микрохолодильники, инокуляторы, дисперсионные частицы) равномерно распределяются в объеме заливаемого металла и оказывают теплофизическое и модифицирующее воздействие как в процессе заливки, так и при последующем затвердевании отливки в форме. Вместе

с тем, иногда отмечается противоречивость данных об их эффективности и в настоящее время интерес к этому прогрессивному способу снижается. Главной проблемой, сдерживающей более широкое применение этого прогрессивного способа для ответственных изделий, является повышенное содержание неметаллических включений в металле отливки.

Тем не менее, отмечается что отливки, полученные по этим вариантам, имеют высокие механические свойства, в частности пластичность и ударную вязкость. Однако вопросы влияния рассматриваемых технологий на механические свойства легированных стальных крупных отливок практически не исследованы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика проведения исследования состояла из нескольких этапов. На первом этапе были получены отливки из сложнолегированной стали по трем вышеуказанным технологиям.

Отливка представляет собой полый цилиндр с патрубками (рис. 1), ее масса составляет 8 т. Для исследования качества металла из полученных отливок вырезали продольные темплеты и пробы. Для выполнения анализа микроструктуры по всей высоте отливки вырезка продольных темплетов осуществлялась из под прибылей без патрубков. Макроструктуру исследовали после травления 15 %-ным раствором персульфата аммония.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На темплетях, вырезанных из под прибылей без отверстий, исследовали макроструктуру (рис. 2) и дендритную структуру центральных зон (рис. 3), на пробах – излом (рис. 4) и механические свойства при нормальной (+20 °С, ГОСТ 1497-84) и повышенной (+350 °С, ГОСТ 9651-84) температурах (табл. 1, 2).

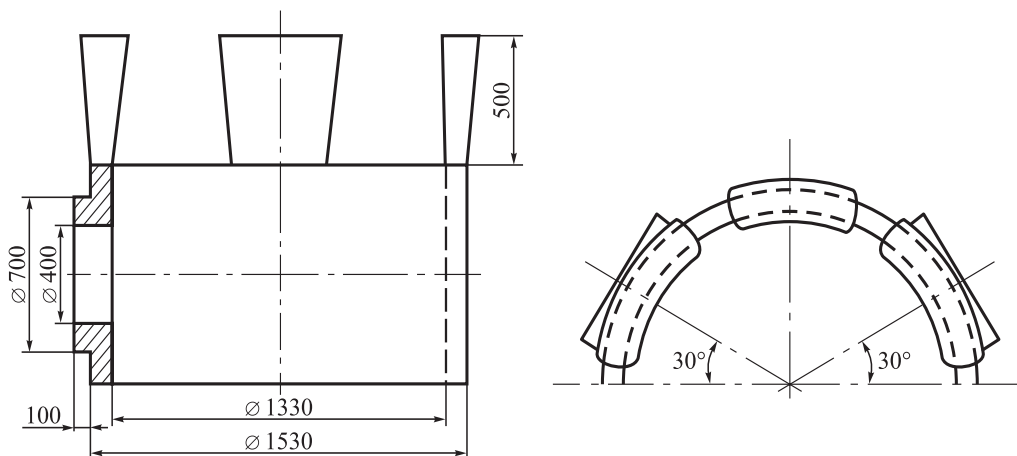


Рис. 1. Общий вид отливки

Fig. 1. General view of the casting

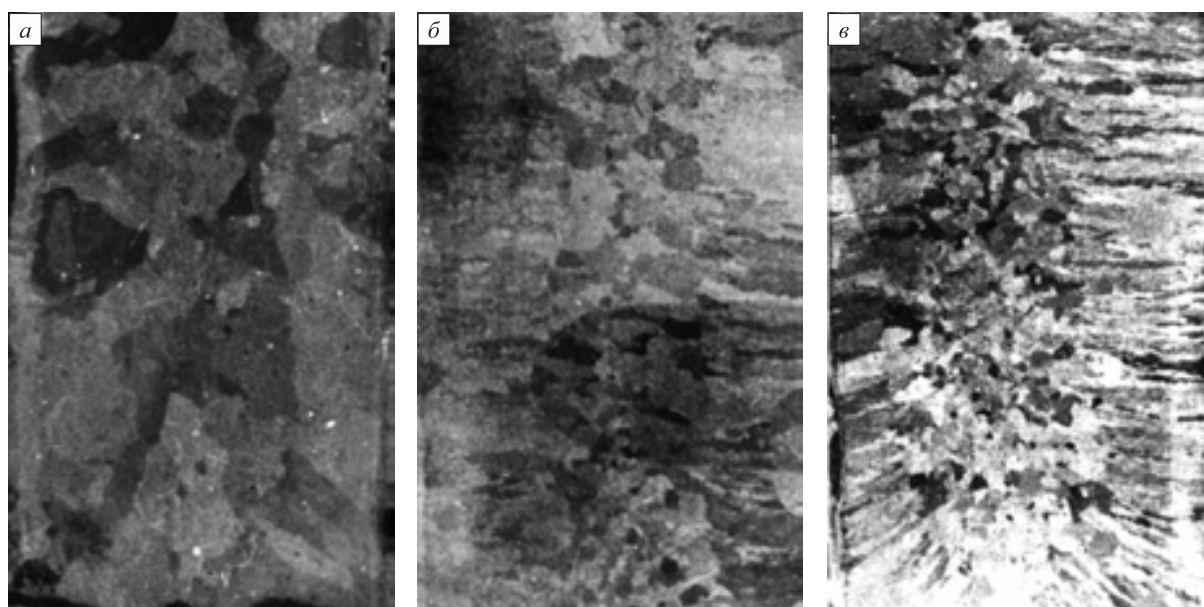


Рис. 2. Макроструктура отливки:
a – объемная форма; *б* – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; *в* – комплексное воздействие

Fig. 2. Casting macrostructure:
a – volume form; *б* – metal-shell form with forced cooling; *в* – complex influence

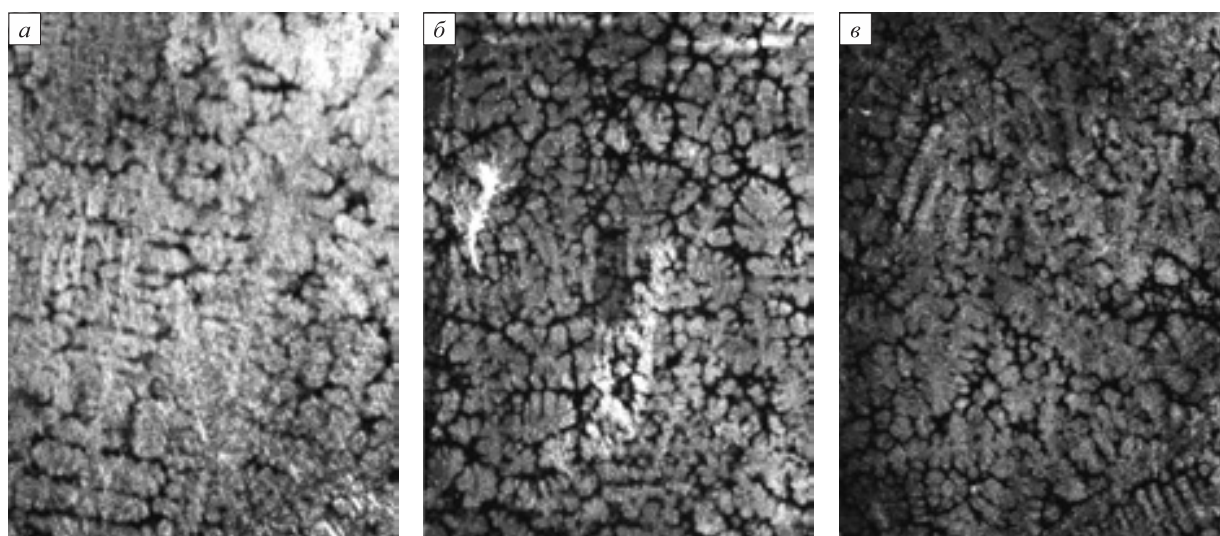


Рис. 3. Дендритная структура центральных зон отливки:
a – объемная форма; *б* – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; *в* – комплексное воздействие

Fig. 3. Dendritic structure of casting central zones:
a – volume form; *б* – metal-shell form with forced cooling; *в* – complex influence

Анализ макроструктуры показал, что контрольная отливка, полученная в объемной форме, отличается крупнозернистым строением и наличием пористости в центральной части отливки (рис. 2, *a*). При затвердевании отливки в ТМОФ с принудительным охлаждением макроструктура существенно отличается – видна плотная зона столбчатых кристаллов, что свидетельствует об увеличении градиента температур по сечению отливки (рис. 2, *б*). При комплексном воздействии на затвердевающую отливку зона столбчатых кристаллов

и мелких равноосных кристаллов значительно измельчается, отливка имеет более плотное и однородное строение (рис. 2, *в*).

Интенсивное охлаждение поверхности тонкостенной формы способствует развитию более последовательной кристаллизации и повышению плотности металла. Размеры дендритов и их разветвленность уменьшаются, в результате чего затвердевающие участки идеально питаются жидким металлом. У отливки, полученной в объемной форме, сохраняется

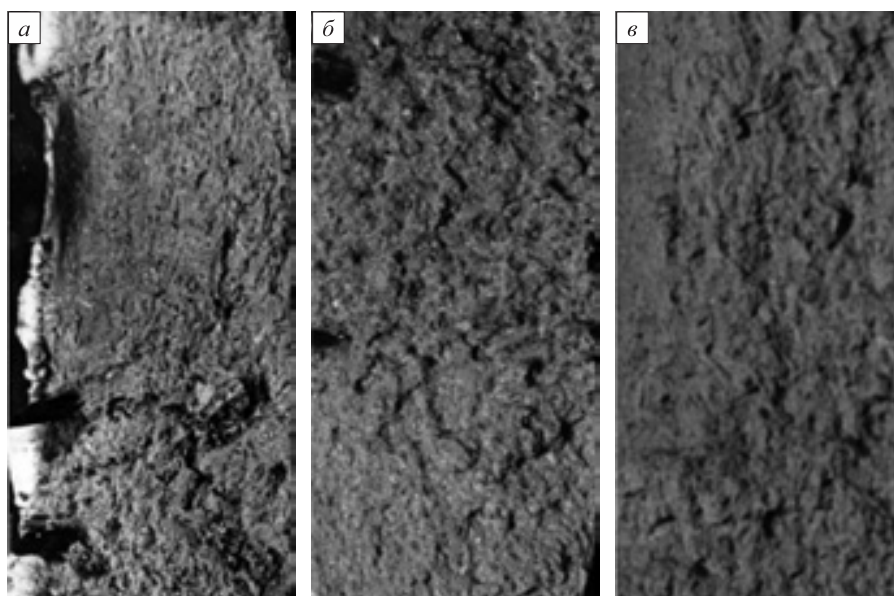


Рис. 4. Макроизломы отливок:
a – объемная форма; *б* – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; *в* – комплексное воздействие

Fig. 4. Macro cross-sectional view of the castings:
a – volume form; *b* – metal-shell form with forced cooling; *c* – complex influence

Таблица 1

**Механические свойства образцов, вырезанных из опытных и контрольных отливок
 (температура испытания +20 °С)**

*Table 1. Mechanical properties of the samples which were cut out from pilot and control castings
 (testing temperature + 20 °С)**

Условия формирования отливки	Направление вырезки образцов	Уровень вырезки образцов	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
Контрольная отливка	Тангенциальное	Верх	<u>683</u> 630	<u>750</u> 686	<u>13,6</u> 10,5	<u>59,7</u> 41,3	<u>1,48</u> 1,13
		Низ	<u>695</u> 673	<u>750</u> 748	<u>14,5</u> 14,1	<u>62,0</u> 58,0	<u>1,65</u> 1,51
	Продольное	Верх	698	756	13,9	57,7	1,55
		Низ	701	776	15,3	65,0	1,70
Внешнее воздействие	Тангенциальное	Верх	<u>767</u> 740	<u>807</u> 775	<u>17,5</u> 17,5	<u>67,7</u> 64,3	<u>1,66</u> 1,48
		Низ	<u>767</u> 753	<u>827</u> 803	<u>18,0</u> 17,3	<u>68,7</u> 67,0	<u>1,70</u> 1,68
	Продольное	Верх	763	827	17,8	68,7	1,75
		Низ	777	833	18,2	68,7	1,80
Комплексное воздействие	Тангенциальное	Верх	<u>720</u> 713	<u>770</u> 755	<u>16,8</u> 18,5	<u>69,0</u> 66,0	<u>1,88</u> 1,80
		Низ	<u>730</u> 723	<u>780</u> 767	<u>17,8</u> 17,5	<u>69,7</u> 68,0	<u>2,03</u> 1,88
	Продольное	Верх	737	783	18,3	69,7	1,91
		Низ	747	793	18,8	71,3	2,02

Примечание. В числителе указаны механические свойства образцов, вырезанных из периферийной зоны, в знаменателе – из центра отливки.

Механические свойства образцов, вырезанных из опытных и контрольных отливок (температура испытания +350 °С)

Table 2. Mechanical properties of the samples which were cut out from pilot and control castings (testing temperature + 350 °C)

Условия формирования отливки	Направление вырезки образцов	Уровень вырезки образцов	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
Нормируемые показатели для деформированного металла			>535	>490	>14,0	>55,0	>0,80
Контрольная отливка	Тангенциальное	Верх	494	555	11,7	50,5	1,30
		Низ	589	617	15,0	62,3	1,65
	Продольное	Верх	516	542	12,0	52,5	1,40
		Низ	587	633	15,6	67,3	1,74
Внешнее воздействие	Тангенциальное	Верх	640	679	18,0	68,6	1,83
		Низ	641	685	18,5	69,5	1,78
	Продольное	Верх	645	688	18,0	67,5	1,87
		Низ	683	698	19,2	68,4	1,85
Комплексное воздействие	Тангенциальное	Верх	619	650	17,7	72,7	2,01
		Низ	638	668	18,7	70,7	2,14
	Продольное	Верх	638	661	18,5	71,6	2,05
		Низ	641	673	19,7	73,4	2,17

более правильное дендритное строение. У опытного металла в центральных зонах отливок дендриты не имеют типичной структуры, а приобретают глобулярную форму. Причем у отливки с вводом микроаллоидных глобулярная дендритная структура более мелкая (рис. 3).

На практике одним из важных критериев для оценки качества стали является вид излома, определенный на пробах, который включается в технические условия на приемку и сдачу изделий из легированных марок стали. Поэтому в данной работе оценку качества полученных отливок после термической обработки начинали с вида излома (рис. 4).

Макроизлом заготовок термически обработанных отливок для всех трех вариантов заливки вязкий. Наиболее плотная структура у отливки, полученной при комплексном воздействии.

В табл. 1, 2 показаны механические свойства металла по сечению и высоте отливки при различных температурах испытаний. Анализируя их, можно отметить следующее: в контрольной отливке механические свойства существенно зависят от места вырезки образцов как по высоте, так и по сечению (табл. 1). Если на нижнем уровне и в периферийных зонах отливки механические свойства находятся на должном уровне, то в центральных зонах, особенно на верхнем уровне, не удается получать значения, удовлетворяющие техническим условиям, причем наблюдается довольно заметная анизотропия свойств. При затвердевании отливки в объемной форме наиболее существенно изме-

няются пластические свойства и ударная вязкость. Так, например, если прочностные свойства по сечению отливки изменяются с 750 МПа у периферии до 686 МПа в центре отливки, то величина относительного удлинения соответственно с 13,6 до 10,5 %, а относительного сужения с 59,7 до 41,3 %. Ударная вязкость при этом также падает с 1,48 до 1,13 МДж/м².

Таким образом, по сечению в контрольной отливке прочность падает приблизительно на 9 %, относительное удлинение и сужение соответственно на 23 и 29 %, а ударная вязкость на 30 %. В центральных зонах по высоте отливки заметна еще большая разница в механических свойствах: σ_B уменьшается на 19 %, δ – на 26 %, относительное сужение на 30 %, а ударная вязкость на 32 %.

Аналогичная зависимость изменения механических свойств по высоте и сечению отливок, полученных по разным вариантам, наблюдается и при температуре испытания +350 °С (табл. 2). Механические свойства в опытных отливках значительно выше, чем у контрольных. Анизотропия свойств по сечению и высоте значительно меньше и отличается большей однородностью во всем объеме металла отливки.

Выводы

В результате проведенных исследований можно констатировать, что исследуемые варианты внешнего и комплексного воздействия на формирующуюся отливку являются весьма перспективными и позволяют получать

ответственные отливки с высокими и однородными механическими свойствами по высоте и сечению при нормальной и повышенной температурах.

Наилучшим сочетанием механических свойств обладает отливка, полученная в металлооболочковой форме с комплексным воздействием на затвердевающий металл путем принудительного охлаждения и ввода инокулятора. При этом получают наиболее высокие пластические свойства и ударная вязкость, а в целом механические свойства – более однородные по сечению и высоте отливки.

Сравнивая механические свойства контрольной отливки и отливки, полученной с вводом инокулятора, видно, что наиболее существенная разница наблюдается в центральных зонах. Так, пластические свойства в указанных зонах изменяются на 35 – 45 %, ударная вязкость – на 35 – 40 %.

Ускоренное охлаждение (как внешнее, так и комплексное) оказывает благоприятное воздействие в первую очередь на пластические свойства и ударную вязкость металла. За счет измельчения структуры усиливается эффект суспензионного питания в процессе затвердевания отливки. В сочетании с преимуществами ТМОФ, отмеченными выше, повышаются механические свойства отливки. Лучшим сочетанием свойств обладает сталь, залитая с вводом микрохолодильников в ТМОФ с принудительным охлаждением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горынин И.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. и др. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопросы материаловедения. 2008. № 2 (54). С. 7 – 19
2. Орыщенко А.С., Голосиенко С.А. Новое поколение высокопрочных судостроительных корпусных сталей // Судостроение. 2013. № 4. С. 73 – 76.
3. 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 // Final report by Honeywell Inc., Armament Systems Division. 1987. September. – 64 p.
4. Wilson A.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.
5. 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 // US Navy, Naval Sea Systems Command, NAVSEA Technical Publication T9074-BD-GIB-010/0300. 2012. – 228 p.
6. Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.А. Высокопрочные судостроительные стали и сплавы // Металлург. 2016. № 2. С. 59 – 63.
7. Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies // McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale, 1998. P. 205 – 216.
8. Senuma T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets (Review) // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 6. P. 520 – 532.
9. High performance steel and titanium castings. National materials advisory board. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering. Report NMAB-296. 1973. – 155 p.
10. Wilson A. Clean steel technology - fundamental to the development of high performance steels // Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness / J. Mahaney ed. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. P. 73 – 88.
11. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 6. С. 3 – 7.
12. Campbell J. Melting, remelting, and casting for clean steel // Steel Research Int. 2017. Vol. 88. No. 1. Article 1600093.
13. High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications. R.L. Klueh, D.R. Harries eds. – PA: ASTM, 2001. – 90 p.
14. Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies of iron and steelmaking // JOM – Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2001. Vol. 53. No. 10. P. 36 – 43.
15. 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.
16. Чернышов Е.А., Романов А.Д., Полихина Е.Ю., Романова Е.А. Повышение качества жидкого металла и отливок из среднелегированной высокопрочной стали // Черные металлы. 2015. № 9. С. 6 – 9.
17. Протопопов Е.В., Комшуков В.П., Ганзер Л.А., Фойгт Д.Б. Перспективные технологии модифицирования металла нанопорошковыми инокуляторами // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2011. № 6 (1338). С. 39 – 44.
18. Руцкий Д.В., Гаманюк С.Б., Зюбан Н.А. и др. Влияние технологии жидко-твердой разливки на особенности строения литой структуры и распределения неметаллических включений в слитке массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА // Металлы. 2017. № 3. С. 21 – 28.
19. Гузенков С.А., Федоров Д.Н., Руцкий Д.В. Повышение конструкционной прочности литой стали модифицированием дисперсионными порошками // Сталь. 2010. № 3. С. 101 – 104.
20. Сидельников В.В., Гурдин В.И. Влияние ультрадисперсных порошков на форму кристаллов и свойства кристаллизующихся систем // Металлургия машиностроения. 2004. № 6. С. 24 – 26.

Поступила в редакцию 1 августа 2017 г.

После доработки 3 июня 2020 г.

Принята к публикации 6 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 8, pp. 644–650.

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF CASTINGS AT DIFFERENT LADLE PROCESSING OF LIQUID AND CRYSTALIZING STEEL

E.A. Chernyshov¹, I.V. Baev², A.D. Romanov¹

¹ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

² PJSC “Krasnoe Sormovo”, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents studies on the effect of external influences when pouring-in high-strength alloyed steel into thin-walled metal-shell molds with external cooling and into the same molds with suspension pouring-in (complex effect on hardened casting). Prerequisites for the selection of these technologies are considered. As control metal,

we have investigated the casting received in volume liquid glass form. Macrostructure, cross-sectional view and mechanical properties of the metal at normal (+20 °C) and raised (+350 °C) temperatures were studied. The most dense and uniform structure and cross-sectional view were received in casting at complex influence. It was established that the main advantage of the offered technologies is increase in uniformity of mechanical properties on the section and height of castings, especially of plastic properties and impact strength. The anisotropy of properties on the section and height of pilot castings is much less, than in control casting. As a result of the studies, it was found that the external and complex effect on the forming casting allows one to affect the macrostructure and to improve the mechanical properties of castings at various test temperatures of the samples. In castings obtained in a metal-shell form with forced cooling, there is no noticeable difference in the mechanical properties both in height and in cross section of the casting. Moreover, the strength properties are by an average 100 MPa higher than that of the control casting, while maintaining high values of ductility and toughness.

Keywords: steel, mechanical properties, kink, structure, crystallization, suspension priming, casting, nonmetallic inclusions, metal-shell form, volume form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-644-650

REFERENCES

- Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I., Nesterova E.V., Orlov V.V. Economically alloyed steels with nano-modified structure intended for operation in extreme conditions. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, no. 2 (54), pp 7–19. (In Russ.).
- Oryshchenko A.S., Golosienko S.A. A new generation of high-strength shipbuilding hull steels. *Sudostroenie*. 2013, no. 4, pp. 73–76. (In Russ.).
- 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*. Final report by Honeywell Inc., Armament Systems Division. 1987, September, 64 p.
- Wilson A.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.
- 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*. US Navy, Naval Sea Systems Command, NAVSEA Technical Publication T9074-BD-GIB-010/0300. 2012, 228 p.
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. High-strength shipbuilding steels and alloys. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 1-2, pp. 186–190.
- Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies. In: *McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale, 1998*, pp. 205–216.
- Senuma T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets (Review). *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 6, pp. 520–532.
- High performance steel and titanium castings. National materials advisory board*. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering. Report NMAB-296. 1973, 155 p.
- Wilson A. Clean Steel Technology – Fundamental to the Development of High Performance Steels. In: *Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness*. Mahaney J. ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999, pp. 73–88.
- Rybin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. Technology for creating nanostructured construction steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, no. 5-6, pp. 267–271.
- Campbell J. Melting, remelting, and casting for clean steel. *Steel Research Int.* 2017, vol. 88, no. 1, article 1600093.
- High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications*. Klueh R.L., Harries D.R. eds. PA: ASTM, 2001, 90 p.
- Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies of iron and steelmaking. *JOM – Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2001, vol. 53, no. 10 pp. 36–43
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.D. Development of metallurgical technologies for the production of critical products from high-strength shipbuilding steels. *Chernye metally*. 2015, no. 3, pp. 33–37. (In Russ.).
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Polikhina E.Yu., Romanova E.A. Improving the quality of liquid metal and castings of medium alloyed high-strength steel. *Chernye metally*. 2015, no. 9, pp. 6–9. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Komshukov V.P., Ganzer L.A., Foigt D.B. Promising technologies for metal modification with nanopowder inoculators. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2011, no. 6 (1338), pp. 39–44. (In Russ.).
- Rutskii D.V., Gamanuk S.B., Zyuban N.A., Petrova V.F., Palatkina L.V. Effect of liquid–solid pouring on the as-cast structure and the distribution of nonmetallic inclusions in a 24.2-t steel 38KhN3MFA ingot. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017, vol. 2017, no. 5, pp. 376–383.
- Guzenkov S.A., Fedorov D.N., Rutskii D.V. Increasing the structural strength of cast steel by powder modification. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 294–297.
- Sidel'nikov V.V., Gurdin V.I. Effect of ultrafine powders on the shape of crystals and properties of crystallizing systems. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2004, no. 6, pp. 24–26. (In Russ.).

Information about the authors:

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

I.V. Baev, Deputy Director on Special-Purpose Equipment

A.D. Romanov, Engineer (nil_st@nntu.ru)

Received August 1, 2017

Revised June 3, 2020

Accepted June 6, 2020