

УДК 669

ИССЛЕДОВАНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Чернышов Е.А.¹, д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование»

Баев И.М.², зам. директора по спец. технике

Романов А.Д.¹, инженер (nil_st@nntu.ru)

Романова Е.А.¹, аспирант

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 экспериментальные данные о влиянии условий кристаллизации высокопрочной среднелегированной стали на механические свойства отливок. Особое внимание уделено исследованию хладостойкости, как наиболее важному показателю служебных свойств ответственных изделий, определяющих надежность и работоспособность литого изделия. Приведены сериальные кривые ударной вязкости, работы развития трещины и процента волокнистости в зависимости от температуры испытания. Рассмотрены три разные технологии получения отливок: в объемную песчаную жидкостекольную форму (контрольная отливка) и опытные отливки (с внешним охлаждением) в тонкостенную форму с дифференцированным по высоте керамическим слоем и принудительным охлаждением водовоздушной смесью и (с комплексным воздействием) в такую же форму с вводом микрохолодильников при заливке жидкой стали. По результатам исследования установлено, что ударная вязкость образцов опытного металла выше во всем исследуемом температурном интервале. Отличительной особенностью является более плавный характер изменения ударной вязкости у опытного металла и отсутствие резкого уменьшения этого показателя, характерного для контрольных образцов. Изменение работы развития трещины (K_{IC}) также зависит от условий формирования отливки. Сериальные кривые показали, что опытный металл обладает меньшей склонностью к хрупкому разрушению (большей хладостойкостью). Аналогичные зависимости получены при исследовании волокнистости излома.

Ключевые слова: сталь, хладостойкость, физико-механические свойства, структура, образцы, сериальные кривые, разрушение металла.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-79-85

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и работоспособности ответственных изделий, работающих при отрицательных температурах, которые характерны для большей территории России, является весьма актуальной и важной задачей [1 – 6].

Создание материалов для данных конструкций сопряжено с решением целого ряда технических проблем, связанных с экстремальными условиями работы [7 – 13]. Причем хладостойкость многих, в том числе и литейных конструкционных сталей, недостаточна. В связи с этим к стальным конструкциям, предназначенным для эксплуатации в данных условиях, предъявляется ряд особых требований: сочетание высоких значений прочностных характеристик с высокими показателями пластичности и ударной вязкости, высокое сопротивление хрупким разрушениям при отрицательных температурах эксплуатации, сопротивление воздействию различных видов нагружения и др.

В работах [14 – 15] изложен опыт разработки литейных хладостойких и износостойких сталей для конкрет-

ных условий эксплуатации. 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 отечественного машиностроения. Особенно важно это вследствие развития специальных отраслей машиностроения, в которых все шире используются литые заготовки из сложнолегированных сталей.

Целью настоящей работы является исследование стандартных механических свойств и хладостойкости металла фасонных отливок из специальной легированной Cr–Ni–Mo–V стали. Для этого отливки подвергали внешнему (вариант 1) и комплексному воздействию (вариант 2) на процессы их кристаллизации и затвердевания. Внешнее воздействие заключалось в том, что отливки получали в тонкостенных металлооболочковых формах с внешним принудительным охлаждением их поверхности и дифференцированным по высоте облицовочным слоем из огнеупорной смеси. При комплексном воздействии отливки изготавливали в таких же условиях с одновременным вводом в струю жидкого

металла при заливке дисперсных твердых частиц, т. е. осуществляли суспензионную заливку. Для сравнения такие же отливки получали в объемную жидкостекольную форму по традиционной технологии, т. е. без какого-либо воздействия на формирующуюся отливку (вариант 3 – контрольный металл).

Предпосылкой для выбора опытных технологий является следующее. Интенсивное охлаждение жидкого металла отливок в металлооболочковой форме способствует развитию последовательной кристаллизации и повышению плотности и механических свойств металла. При суспензионной заливке вводимые при заливке жидкого металла твердые порошкообразные частицы (микрохолодильники, инокуляторы, дисперсионные частицы) равномерно распределяются в объеме заливаемого металла и оказывают двойное воздействие на жидкий металл:

- теплофизическое – интенсивно снимают избыточную теплоту перегрева и объемную усадку металла;
- модифицирующее, являясь дополнительными центрами кристаллизации как в процессе заливки, так и при последующем затвердевании отливки в форме [16 – 18].

В качестве микрохолодильников использовался железный порошок ПЖВ 1.450.26 ГОСТ 9849-86 в количестве 2 % от массы заливаемой стали с добавкой 0,1 % силикокальция. Ввод микрохолодильников осуществлялся по известной схеме из бункера-дозатора, закрепленного на разливочном ковше через специальную литниковую надставку.

Отливки, полученные по этим вариантам, имеют высокие механические свойства, в частности пластичность и ударную вязкость. Однако вопросы влияния рассматриваемых технологий на хладостойкость и хладоломкость легированных стальных отливок практически не изучены.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика проведения исследования состояла из нескольких этапов. На первом этапе были получены

отливки из сложнoleгированной стали по трем вышеуказанным технологиям. Сначала из отливок вырезали темплеты для изготовления образцов и последующего определения механических свойств и хладостойкости. Темплеты вырезали из подприбыльных зон отливок, образцы – из центральных верхних зон темплетов.

Затем для оценки потенциальной возможности исследуемой стали изучали влияние условий затвердевания на механические свойства металла отливок в литом состоянии (табл. 1). На заключительном этапе исследовали механические свойства термообработанных образцов при нормальной температуре (табл. 2) и хладостойкость при отрицательных температурах по серийным кривым.

Механические свойства (прочность, пластичность и ударную вязкость) определяли по стандартным методикам.

Хладостойкость устанавливали по серийным кривым $KCU = f(T)$ и $KCV = f(T)$ на ударных образцах (ГОСТ 9454-78) по методике А.П. Гуляева и характеру излома (% В – процент волокнистости). За критерий перехода из вязкого состояния в хрупкое или температуру хрупкости (T_k) в первом случае принимали $KCU = 0,6 \text{ МДж/м}^2$, во втором случае $T_k^B = 70 \%$, вид излома оценивали на основании подсчета участков кристаллического или вязкого разрушения.

При определении хладостойкости ударные образцы загружали в специальный теплоизоляционный термостат с охлаждающей смесью. Диапазоны температур испытания от +20 °С до –100 °С. Охлаждение до заданной температуры испытания производили в смеси спирта с жидким азотом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведен излом проб исследуемой стали.

Отливка, полученная в металлооболочковой форме, имеет кристаллический, блестящий излом (рис. 1, а). У отливки, полученной в металлооболочковой форме с вводом микрохолодильников, волокнистый с грубым дендритным рисунком излом (рис. 1, б). Излом отлив-

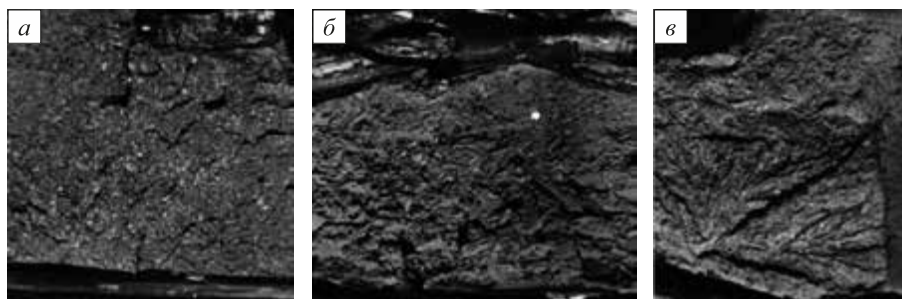


Рис. 1. Макроизломы отливок в литом состоянии:

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

Fig. 1. Macrobreaks of castings in a cast state:

а – metalshell form with compulsory cooling; б – the same with the input of microrefrigerators; в – volume form

Механические свойства стали после термообработки

Mechanical properties of the steel after heat treatment

Вариант заливки	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
1	740,0	775,0	17,5	64,3	1,48
2	713,0	755,0	18,5	66,0	1,8
3	630,0	685,0	10,5	49,3	1,13

ки, полученной в объемной форме, получился смешанным (рис. 1, в).

Очевидно, что причину неудовлетворительного вида излома и снижения механических свойств нужно искать в особенностях строения литой стали. Известно, что основная особенность строения литой стали заключается в ее крупнозернистости [19 – 21]. Значительное улучшение структуры излома, а также лучшее сочетание свойств позволяет получить термическая обработка, которую проводили по следующему режиму: ступенчатый гомогенизацион-

ный отжиг и закалка с высоким отпуском. При этом макроизлом отливок (рис. 2) для всех трех вариантов получили вязким. Из поломанных заготовок изготавливали образцы для испытания на растяжения и ударную вязкость (табл. 1) и определяли хладостойкость стали (рис. 3 – 5).

Результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что наиболее высокое сочетание прочностных, пластических свойств и ударной вязкости получены у отливки, изготовленной при комплексном воздействии на затвердевающий металл.

Однако одним из основных свойств стали, определяющим ее надежность в эксплуатации, является ее способность противостоять разрушению в широком диапазоне температур. В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется анализу хрупкого разрушения (хладостойкости). Для этого предпочтение отдается методам ударных испытаний, как наиболее полно отражающим оценку качества металла. При этом ударная вязкость является суммарной величиной: $KC = KC_3 + KC_p$, где KC_3 – работа, затрачиваемая на

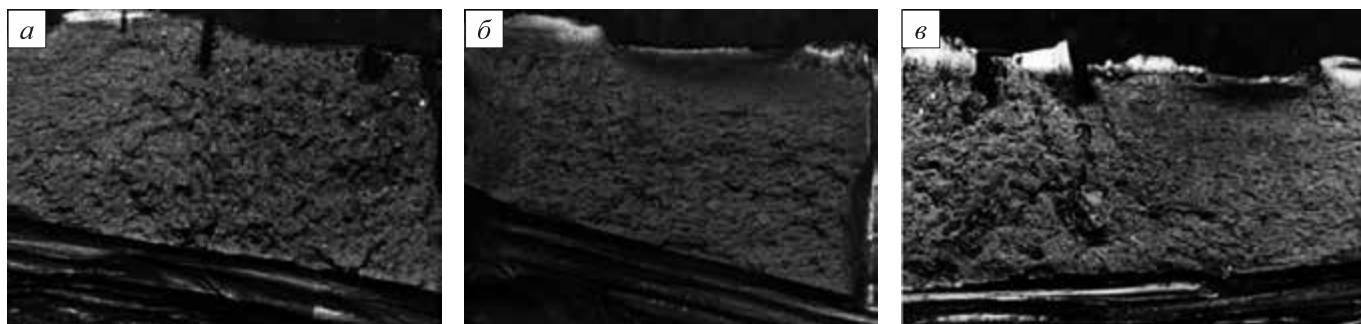


Рис. 2. Излом пробы отливки после термической обработки. Варианты заливки: а – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; б – то же с вводом микрохолодильников; в – объемная форма

Fig. 2. Sample break from casting after heat treatment, casting options: а – metalshell form with compulsory cooling; б – the same with the input of microrefrigerators; в – volume form

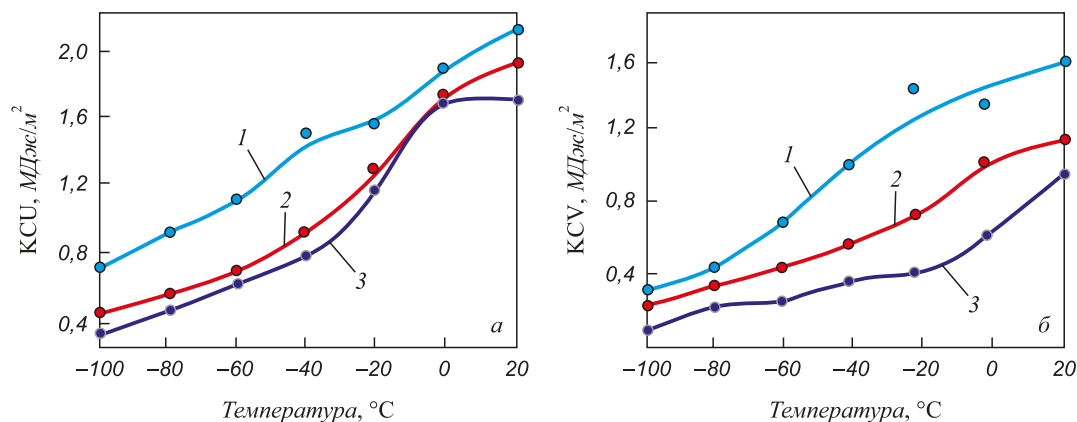


Рис. 3. Сериальные кривые ударной вязкости образцов с радиусом надреза $R = 1,0$ мм (а) и $r = 0,25$ мм (б): 1 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников; 2 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; 3 – объемная форма

Fig. 3. Serial curves of impact strength of samples with a radius of a cut of $R = 1.0$ mm (a) and $r = 0.25$ mm (b): 1 – metalshell form with compulsory cooling and input of microrefrigerators; 2 – metalshell form with compulsory cooling; 3 – volume form

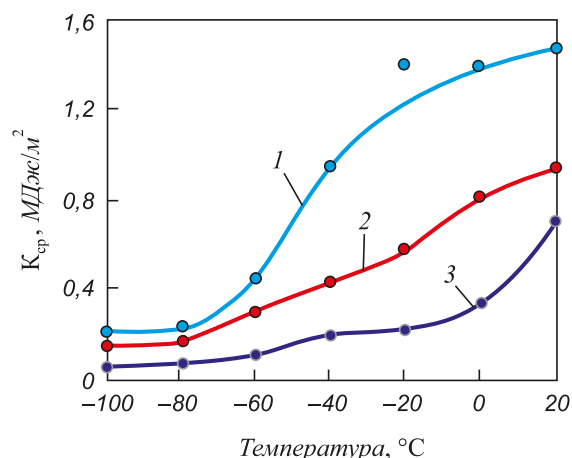


Рис. 4. Сериальные кривые работы развития трещины K_{Cr} : 1 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников; 2 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; 3 – объемная форма

Fig. 4. Serial curve of work of crack development K_{Cr} : 1 – metalshell form with compulsory cooling and input of microrefrigerators; 2 – metalshell form with compulsory cooling; 3 – volume form

зарождение трещины; K_{Cr} – работа, затрачиваемая на распространение трещины.

Поскольку ударная вязкость является интегральной характеристикой, а условия работы изделия на этапах зарождения и развития трещины существенно отличаются, следовательно вполне естественным является изучение вязкости металла до момента зарождения трещины и при ее наличии. Если учесть тот факт, что в материале всегда имеются концентраторы напряжений в виде дефектов (микротрещины, неметаллические включения и т. п.), то надежность работы конструкции определяется, главным образом, сопротивлением материала распространению трещины.

Метод построения сериальных кривых позволяет дать качественную оценку склонности стали к хрупкому разрушению в зависимости от способа получения, технологии обработки, наличия концентраторов, структуры и других факторов [15]. При этом ударная вязкость, полученная на образцах с надрезом $R = 1,0$ мм, не всегда правильно отражает способность стали к хрупкому или вязкому разрушению. Дело в том, что в реальных конструкциях концентраторы напряжений (дефекты) зачастую оказываются более острыми, чем указанный надрез, следовательно ударная вязкость на таких образцах получается завышенной. В свою очередь, даже на образцах одинакового сечения, но с разным по остроте надрезом ($R = 1,0$ мм и $r = 0,25$ мм), для одного и того же материала склонность к хрупкому разрушению оказывается различной. Доля энергии, затраченной на деформацию на образцах с острым надрезом, меньше, чем у образцов с мягким надрезом. Поэтому такой образец более показателен для оценки сопротивления развития трещины. В работе построены сериальные кривые по

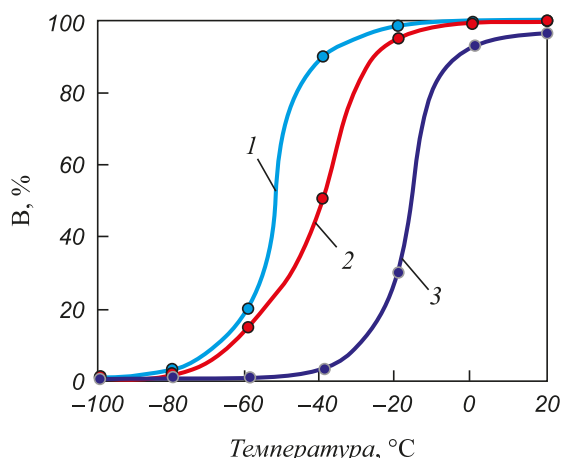


Рис. 5. Изменение доли волокнистой составляющей в изломе: 1 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников; 2 – металлооболочковая форма с принудительным охлаждением; 3 – объемная форма

Fig. 5. Change of a fibrous component value in a break: 1 – metalshell form with compulsory cooling and input of microrefrigerators; 2 – metalshell form with compulsory cooling; 3 – volume form

результатам испытаний ударных образцов как с мягким, так и жестким надрезом.

На рис. 3 приведены сериальные кривые изменения ударной вязкости образцов с «мягким» ($R = 1,0$ мм) и «острым» ($r = 0,25$ мм) надрезом в зависимости от технологии получения отливок. Видно, что ударная вязкость опытного металла при отрицательных температурах выше как для образцов с «мягким», так и «острым» надрезом, по сравнению с контрольным металлом. Кривые ударной вязкости с понижением температуры у опытных отливок имеют более плавный характер, в то время как у контрольной отливки с температуры -20 °C происходит более резкое падение ударной вязкости. Во всем исследованном диапазоне температур испытания значения ударной вязкости в среднем на $0,2 - 0,3$ МДж/м² выше у опытных отливок по сравнению с контрольной.

Данные, приведенные на рис. 3, показали, что T_K , определяемая по сериальным кривым, зависит от условий формирования отливки и остроты надреза. У опытного металла T_K смещается в область более отрицательных температур на $30 - 40$ °C в зависимости от технологии получения отливок.

На рис. 4 показано изменение работы развития трещины в зависимости от условий затвердевания отливок. Сериальные кривые демонстрируют, что опытный металл обладает большим сопротивлением развитию трещины или меньшей склонностью к хрупкому разрушению в исследованном диапазоне температур, а следовательно, большей хладостойкостью при отрицательных температурах.

На рис. 5 изображено изменение доли вязкой составляющей в изломе (B %) в зависимости от темпе-

ратуры испытания. Приведенные результаты показали, что меньшая склонность стали к хрупкому разрушению наблюдается у опытного металла. Во всем критическом интервале хрупкого перехода (от 100 до 0 % В) волокнистая составляющая в изломе составляет большую долю для металла, полученного при комплексном воздействии. Меньший процент волокнистости в изломе у контрольного металла, наилучшие показатели у металла, залитого в металлооболочковые формы с принудительным охлаждением и вводом микрохолодильников.

Выводы

Наилучшее сочетание прочностных, пластических свойств и ударной вязкости для исследуемой стали получено у опытных с отливок с внешним и комплексным воздействием на процесс затвердевания.

Сопоставление серийных кривых хорошо выявляет последовательность их расположения для трех исследованных вариантов, если их расположить по возрастающему значению хладостойкости: объемная форма, металлооболочковая форма с принудительным охлаждением и комплексное воздействие на затвердевающую отливку.

Применение внешнего, а тем более комплексного воздействия обеспечивает повышение сопротивления металла развитию трещины. С увеличением остроты надреза условный порог хладноломкости ($T_K^{B=70}$ и $T_K^{KCU=0,6}$) смещается в сторону положительных температур.

Таким образом, воздействуя на процесс формирования затвердевающей отливки, можно увеличить надежность изделий из исследуемой стали за счет повышения уровня пластичных и вязких свойств, а также хладостойкости стали при отрицательных температурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Хладостойкие стали для технических средств освоения арктического шельфа // Вопросы материаловедения. 2009. № 3(59). С. 108 – 126.
2. Владимиров Н.Ф., Голубев А.А. Развитие технологии производства листовых корпусных сталей // Вопросы материаловедения. 1999. № 3. С. 45 – 51.
3. Малышевский В.А., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И. Новые корпусные стали для судостроения // Судостроение. 2004. № 5. С. 107 – 110.
4. Орыщенко А.С., Ильин А.В., Гусев И.А., Ларионов А.В. Новые методы прогнозирования работоспособности конструкционных материалов для эксплуатации в Арктике // Сб. докл. Всеросс. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2013». Москва, 23.02 – 01.03.2013. – М., 2013. С. 23.
5. Владимиров Н.Ф., Ильин А.В., Ларионов А.В. и др. Изменение механических свойств и хладостойкости металла штрипса и труб стали категории прочности К60 на различных этапах изготовления // Вопросы материаловедения. 2011. № 4(68). С. 5 – 16.
6. Гуменюк В.А., Иванов Ю.Г., Красиков С.В. и др. Исследование сопротивления низкотемпературному хрупкому разрушению новых сталей для магистральных трубопроводов и судостроительных сталей высокой прочности // Тр. Крыловского госуд. науч. центра. 2010. № 56. С. 107 – 118.
7. Орыщенко А.С., Голосиенко С.А. Новое поколение высокопрочных судостроительных корпусных сталей // Судостроение. 2013. № 4. С. 73 – 76.
8. Горынин И.В., Малышевский В.А., Легостаев Ю.Л., Грищенко Л.В. Высокопрочные свариваемые стали // Вопросы материаловедения. 1999. № 3. С. 47 – 52.
9. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А. и др. Экономно легированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопросы материаловедения. 2008. № 2. С. 7 – 19.
10. 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.
11. Башаев В.К., Ильин А.В., Филин В.Ю., Гусев М.А. Об определении хладостойкости современных высокопрочных сталей для арктических конструкций // Науч.-технич. сб. Российского морского регистра судоходства. 2015. № 38 – 39. С. 74 – 79.
12. Гусев М.А., Ильин А.В., Калинин Г.Ю., Федорова Т.А. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики // Судостроение. 2014. № 5. С. 39 – 43.
13. Ильин А.В., Филин В.Ю. О соотношении локальных и энергетических критериев нестабильного хрупкого разрушения хладостойких сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 12. С. 44 – 49.
14. Шульте Ю.А. Производство отливок из стали. – Донецк, 1983. – 184 с.
15. Гуляев А.П. Чистая сталь. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
16. Затуловский С.С. Суспензионная заливка. – Киев: Наукова думка, 1981. – 260 с.
17. Совершенствование технологии стального литья / А.А. Рыжиков, М.И. Роцин, В.И. Фокин и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 143 с.
18. Чернышов Е.А. Влияние технологии получения стальных заготовок на склонность к хрупкому разрушению // Вопросы материаловедения. 2010. № 3. С. 27 – 32.
19. Д.К. Чернов и наука о металлах / Под ред. Н.Т. Гудкова. – Л., М.: Металлургиздат, 1950. – 563 с.
20. Бельнский С.В. Исследование литой и ковальной стали. – М.: Машгиз, 1952. – 211 с.
21. Садовский В.Д. Структурная наследственность стали. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.

Поступила 19 марта 2017 г.

COLD RESISTANCE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH MEDIUM ALLOY STEEL DEPENDING ON THE TECHNOLOGY OF CAST BILLETS PRODUCTION

E.A. Chernyshov¹, I.M. Baev², A.D. Romanov¹, E.A. Romanova¹

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

² PJSC “Plant “Krasnoe Sormovo”, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Experimental data on influence of conditions of high-strength steel crystallization on its mechanical properties are given in the work. Special attention is paid to the cold resistance as to the most important indicator of operation properties of the responsible products defining reliability and operability of a cast final product. Serial curves of impact strength, work of crack development and percent of fibration are given depending on test temperature. The possibility of increase in cold resistance of the cast alloyed steel is shown depending on casting technology: in a volume sandy form (control casting), in a thin-walled form with the ceramic layer and compulsory cooling with air-and-water mix differentiated on height (with external cooling) and in the same form with input of microrefrigerators when filling liquid steel (with complex impact). According to the research results it was established that the impact strength of the experimental metal obtained at complex impact on the hardened metal is higher in all studied temperature interval. Distinctive feature is smoother change nature of impact strength of experimental metal and lack of sharp reduction of this indicator for control samples. Change of work of crack development also depends on conditions of crystallization and cooling of casting metal. Serial curves have shown that tested metal has smaller tendency to fragile destruction (higher cold resistance). Similar dependences are received during the research of break fibration.

Keywords: steel, cold resistance, physic-mechanical properties, structure, sample, serial curves, metal fracture.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-79-85

REFERENCES

- Gorynin I.V., Rybin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. Cold resistant steels for technical units for the Arctic shelf mastering. *Voprosy materialovedeniya*. 2009, no. 3(59), pp. 108–126. (In Russ.).
- Vladimirov N.F., Golubev A.Ya. Development of the production technology of sheet hull steel. *Voprosy materialovedeniya*. 1999, no. 3, pp. 45–51. (In Russ.).
- Malyshevskii V.A., Semicheva T.G., Khlusova E.I. New hull steels for shipbuilding. *Sudostroenie*. 2004, no. 5, pp. 107–110. (In Russ.).
- Oryshchenko A.S., Il'in A.V., Gusev I.A., Larionov A.V. New forecasting methods of operability of constructional materials for maintenance in the Arctic. In: *Sb. dokladov Vserossiiskoi konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam svoistv materialov “TestMat-2013”*. Moskva 28.02.2013–01.03.2013 [Reports of the All-Russian Conf. on Testing and Research of Material Properties “TestMat-2013”, Moscow]. 2013, p. 23. (In Russ.).
- Vladimirov N.F., Il'in A.V., Larionov A.V. etc. Change of mechanical properties and cold resistance of the metal of the strip and pipes of steel with K60 durability category on different manufacturing stages. *Voprosy materialovedeniya*. 2011, no. 4(68), pp. 5–16. (In Russ.).
- Gumenyuk V.A., Ivanov Yu.G., Krasikov S.V., Il'in A.V., Filin V.Yu. Resistance to the low-temperature brittle fracture of new steel for main pipelines and ship-building high strength steel. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2010, no. 56, pp. 107–118. (In Russ.).
- Oryshchenko A.S., Golosienko S.A. New generation of high-strength ship-building hull steels. *Sudostroenie*. 2013, no. 4, pp. 73–76. (In Russ.).
- Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Legostaev Yu.L., Grishchenko L.V. High-strength welded steel. *Voprosy materialovedeniya*. 1999, no. 3, pp. 47–52. (In Russ.).
- Gorynin I.V., Rybin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I. etc. Economically alloyed steels with nanomodified structure for operation in extreme conditions. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, no. 2, pp. 7–19. (In Russ.).
- Chernyshov E.A., Romanov A.D., Polikhina E.Yu., Romanova E.A. Improvement of quality of liquid metal and castings from medium alloy high-strength steel. *Chernye metally*. 2015, no. 9, pp. 6–9. (In Russ.).
- Bashaev V.K., Il'in A.V., Filin V.Yu., Gusev M.A. Determination of cold resistance of the modern high-strength steels for the Arctic constructions. In: *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* [Scientific and technical collection of the Russian maritime register of shipping]. 2015, no. 38-39, pp. 74–79. (In Russ.).
- Gusev M.A., Il'in A.V., Kalinin G.Yu., Fedorova T.A. Certification of ship-building materials for the vessels exploited in the Arctic conditions. *Sudostroenie*. 2014, no. 5, pp. 39–43. (In Russ.).
- Il'in A.V., Filin V.Yu. Ratio of local and energetic criteria of unstable brittle fracture of cold-resistant steel. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2013, vol. 79, no. 12, pp. 44–49. (In Russ.).
- Shul'te Yu.A. *Proizvodstvo otlivok iz stali* [Production of steel castings]. Donetsk, 1983, 184 p. (In Russ.).
- Gulyaev A.P. *Chistaya stal'* [Pure steel]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p.
- Zatulovskii S.S. *Suspenzionnaya zalivka* [Suspension casting]. Kiev: Naukova dumka, 1981, 260 p. (In Russ.).
- Ryzhikov A.A., Roshchin M.I., Fokin V.I. etc. *Sovershenstvovanie tekhnologii stal'nogo lit'ya* [Enhancement of steel casting technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 143 p. (In Russ.).
- Chernyshov E.A. Influence of production technology of steel billets on tendency to fragile destruction. *Voprosy materialovedeniya*. 2010, no. 3, pp. 27–32. (In Russ.).
- D.K. Chernov i nauka o metallakh [D.K. Chernov and metals science]. Gudkov N.T. ed. Leningrad, Moscow: Metallurgizdat, 1950, 563 p. (In Russ.).
- Belynskii S.V. *Issledovanie litoi i kovanoi stali* [Research of cast and hammered steel]. Moscow: Mashgiz, 1952, 211 p. (In Russ.).
- Sadovskii V.D. *Strukturnaya nasledstvennost' stali* [Structural heredity of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 208 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.A. Chernyshov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgical Technology and Equipment”
I.M. Baev, Deputy Director of Special Machines
A.D. Romanov, Engineer (nil_st@nntu.ru)
E.A. Romanova, Postgraduate

Received March 19, 2017