



УДК 621.745.55

Поступила 22.04.2015

ЛИТЕЙНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРСТОЙКИХ СТАЛЕЙ CASTING AND MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT STEELS

М. М. ЯМШИНСКИЙ, Г. Е. ФЕДОРОВ, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина

M. M. YAMSHINSKIY, G. E. FEDOROV, National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, Ukraine

Изучено влияние хрома и алюминия на литейные и механические свойства хромистых жаростойких сталей для изготовления литых деталей, работающих в агрессивных средах до 1250 °С. Установлено, что при оптимальном соотношении основных компонентов стали имеют удовлетворительные литейные и механические свойства, позволяющие изготавливать отливки различных массы, геометрии и габаритных размеров.

Influence of chrome and aluminums on casting and mechanical properties of chromic heat-resistant steels for making poured details, working in aggressive environments to 1250 °C is studied. It is determined that under optimum relationship of basic components steels have satisfactory casting and mechanical characteristics, allowing to make foundings of different mass, geometry and overall sizes. It becomes obvious that better oxidation resistance at different temperatures can be reached by various contents of chromium and aluminum. Experimental findings have proved that adding aluminum to chromium steel improves the oxidation resistance of steels investigated. To get steels with more than 25% chromium with addition of 2–3% aluminum are aims for further investigation.

Ключевые слова. Жаростойкая сталь, литейные свойства, механические свойства, жаростойкость, жидкотекучесть, линейная усадка, твердость, термостойкость.

Keywords. Heat resistant steel casting properties, mechanical properties, heat resistance, flowability, linear shrinkage, hardness, heat resistance.

Жаростойкие стали для изготовления литых деталей, работающих в агрессивных средах при температурах до 1300 °С, должны иметь не только высокие эксплуатационные характеристики (окалиностойкость, термостойкость и ростоустойчивость), но и удовлетворительные технологические свойства.

Многочисленными работами И. И. Корнилова, Ф. Ф. Химушина, К. И. Ващенко, Ю. А. Нехендзи и других выдающихся ученых-специалистов сталелитейного производства [1–9] доказана возможность разработки сплавов с высокой жаростойкостью легированием железа недорогими химическими элементами – хромом, алюминием, кремнием, титаном и др. В этом случае железо приобретает не только высокие эксплуатационные свойства, но и может использоваться как литейный материал для изготовления высококачественных фасонных изделий для работы в экстремальных условиях.

Существуют три наиболее обоснованные и проверенные на практике теории легирования [10–12] с целью повышения жаростойкости сплавов в зависимости от механизма действия легирующих добавок:

- ионы легирующего компонента должны входить в кристаллическую решетку оксида основного металла, уменьшая его дефектность и скорость диффузионных процессов;
- легирующий компонент должен образовывать на поверхности сплава свой защитный оксид, который препятствует окислению основного металла;
- легирующий компонент должен образовывать с основным компонентом двойственные оксиды типа шпинелей, которые имеют повышенные защитные свойства.

Эти теории жаростойкого легирования металлов дополняют одна другую и дают возможность не только теоретически обосновать существующие сплавы, но и более рационально подойти к разработке рецептуры жаростойких металлических материалов с учетом их литейных, механических и технологических свойств.

Известно [13–17], что процесс изготовления отливок из высоколегированных сталей сопровождается определенными трудностями, поскольку эти стали менее технологичны, чем обычные углеродистые стали. Вследствие низкой теплопроводности сталей и неравномерного характера их кристаллизации, связанного с природой элементов, входящих в состав сплава, наличия сопутствующих примесей, условий охлаждения отливок и других факторов, в металле возникают химическая и физическая неоднородности. Перечисленные явления содействуют развитию значительных структурных напряжений и получению неравномерных механических, физических и других свойств металла как во всем объеме, так и в пределах одного зерна.

Технологичность литейных сплавов, в том числе и сталей, определяют поведением металла в условиях изготовления из них качественных изделий.

В комплексе технологических свойств жаростойких сталей важное место занимают их литейные характеристики: жидкотекучесть, линейная и объемная усадки, трещиностойкость, поверхностное натяжение, плотность в расплавленном состоянии, пленкообразование и др. Литейные свойства сталей зависят от физико-химических особенностей металла и технологических характеристик литейной формы: они проявляются в жидком состоянии, во время кристаллизации и в твердом состоянии.

Высокая склонность жаростойких сталей с высоким содержанием хрома и алюминия к вторичному окислению, особенно в атмосфере воздуха при их разливке в литейные формы, создает определенные трудности в изготовлении качественных отливок, поскольку расплав покрывается плотными пленками оксидов хрома и алюминия. Эти пленки попадают в струю жидкого металла, снижают его жидкотекучесть, препятствуют получению отливки необходимой геометрии, а, оставшись в теле литой детали, нарушают сплошность металла изделия и снижают его механические и эксплуатационные свойства. Для достижения необходимой жидкотекучести стали перегревают. Это также негативно влияет на структуру металла и существенно снижает возможности литых деталей.

Жаростойкие стали с высоким содержанием хрома, кремния и алюминия относят к ферритным. Во время охлаждения они не имеют фазовых превращений, размеры зерен первичной кристаллизации в отливке остаются неизменными даже после любых режимов термической обработки.

Перегрев металла существенно способствует развитию столбчатых кристаллов, образованию большого количества дефектов газового происхождения и горячих трещин.

Повышенные скорости заполнения литейной формы расплавом влияют на качество отливок в таком же направлении, как и перегревание металла перед его разливкой.

Литейные дефекты в сочетании с крупнозернистой структурой снижают эксплуатационные свойства отливок, изготовленных из таких сталей: способствуют развитию межкристаллитной коррозии, образованию концентраторов напряжений и деформаций, а также резкому снижению термостойкости отливок.

Добиться мелкого зерна в отливках из жаростойкой стали заливкой форм металлом со сниженной температурой практически невозможно, поскольку при этом интенсивно проявляются другие недостатки: замедляется скорость всплытия пленок, неметаллических включений, частиц шлака, затрудняются условия удаления газов из металла, а также ухудшаются условия питания отливок. При заливке форм с низких температур металла в отливках образуются недоливы, спаи, раковины разного происхождения, которые часто являются причинами брака литых заготовок. Своеобразие технологических свойств таких жаростойких сталей является значительным тормозом широкого внедрения их в производство, несмотря на высокие эксплуатационные характеристики.

Таким образом, важнейшей задачей при изготовлении качественных отливок из жаростойких сталей является выбор оптимального соотношения основных компонентов – хрома и алюминия, которые обеспечили бы наилучший комплекс литейных, механических и эксплуатационных характеристик.

Изучено влияние хрома на литейные и механические свойства жаростойких сталей в диапазоне концентраций 13–36% и алюминия – до 7,0%. Исследованиями установлено, что практическая жидкотекучесть хромистых сталей с разным содержанием алюминия значительно улучшается с повышением концентрации хрома (рис. 1, а) в результате снижения температуры плавления сталей. Однако повышение концентрации алюминия до 2,0–3,0% снижает жидкотекучесть хромистых сталей вследствие образования большого количества оксидов, увеличивающих вязкость стали.

Некоторое повышение практической жидкотекучести после добавок алюминия свыше 3,0% можно объяснить значительным снижением теплопроводности жидкого металла, более медленным охлаждением движущейся струи расплава, образованием плотной «рубашки» из оксидов, препятствующей проникновению жидкого металла в межзерновые пространства формовочной смеси и обеспечивающей оптимальное поступление металла в полость формы.

Увеличение содержания хрома в сталях существенно снижает линейную усадку исследованных сталей (рис. 1, б). Например, увеличение содержания хрома в стали с 13 до 35% при 1% алюминия снижает линейную усадку с 2,64 до 1,66%, что можно объяснить увеличением ферритной составляющей в структуре стали.

Небольшие добавки алюминия в хромистые стали заметно снижают их усадку вследствие дальнейшего повышения ферритизации стали, уменьшения общего количества газов в металле переводом их в тугоплавкие соединения (оксиды, нитриды алюминия), которые являются дополнительными центрами кристаллизации, способствуют измельчению зерна и ликвидации легкоплавких межзерновых прослоек. С повышением в стали содержания хрома перегиб кривых усадки сдвигается влево. Это позволяет определить соотношение хрома и алюминия в стали для реальной отливки с конкретными геометрией и габаритными размерами, ориентируясь на одну из основных литейных характеристик сплавов – литейную усадку.

Общепризнанно, что причина возникновения горячих трещин – механическое или термическое торможение, вызванное усадкой. Известно также, что горячие трещины образуются при температурах, близких к температурам окончательной кристаллизации, т. е. в период, когда между зернами еще есть жидкая фаза, наличие которой обуславливает низкие прочность и пластичность металла. Здесь особенно проявляется вредное влияние широкого интервала кристаллизации, когда увеличиваются период пребывания металла в двухфазном состоянии и время существования межкристаллических жидких пленок, что способствует уменьшению сопротивления образованию горячих трещин.

Вообще трещиностойкость стали представляет собой разницу между допустимым темпом деформации и темпом нарастания усадки.

В отливках из сталей с низкой теплопроводностью, к которым относят и стали с высоким содержанием хрома и алюминия, всегда существует большая разница температур между внешними и внутренними зонами. Во внешних зонах, имеющих более низкую температуру, а поэтому более прочных, процессы усадки развиваются интенсивнее, что способствует отрыву от них средних зон (центральные зоны находятся в это время еще в жидком состоянии).

Заметное влияние на процессы образования горячих трещин оказывают адсорбционные явления, связанные с наличием в металле примесей, имеющих поверхностно-активные свойства. На эти процессы также влияют теплофизические характеристики формовочных материалов, возможные заливы металла по разьему формы, местные перегревы стенок литейной формы, расположенных напротив подведения металла в полость формы и др.

Все изложенные факторы обязательно необходимо учитывать при изготовлении отливок из жаростойких хромоалюминиевых сталей.

Снижение коэффициента термического сжатия вследствие увеличения ферритной составляющей в структуре после повышения содержания хрома и при оптимальных добавках алюминия положительно сказывается на трещиностойкости хромоалюминиевых сталей (рис. 2, а). Известно, что трещиностой-

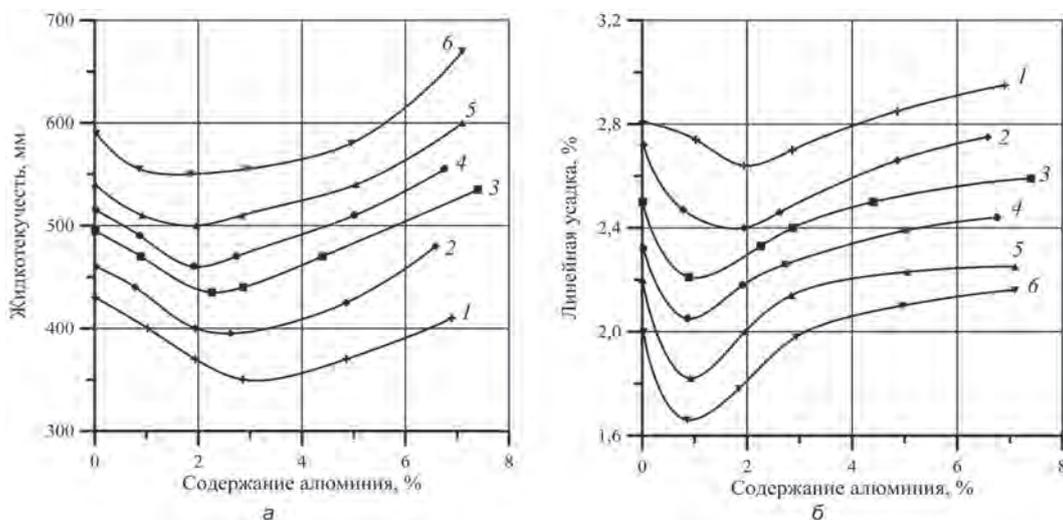


Рис.1. Влияние хрома и алюминия на практическую жидкотекучесть (а) и линейную усадку (б) жаростойких сталей: 1 – 13,68% Cr; 2 – 17,72; 3 – 22,28; 4 – 25,68; 5 – 29,80; 6 – 35,83% Cr

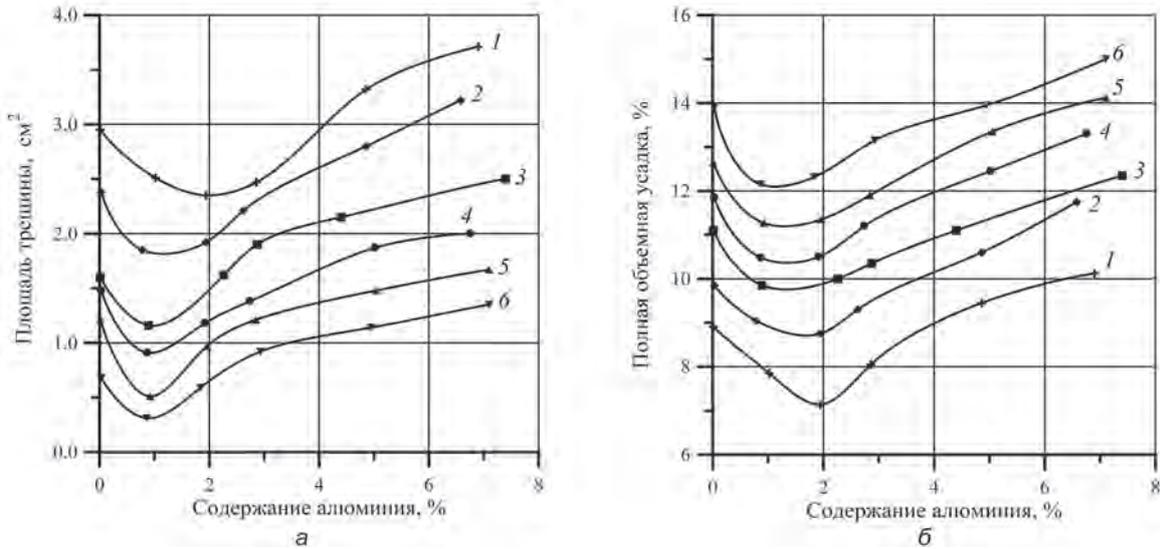


Рис. 2. Влияние хрома и алюминия на трещиностойкость (а) и полную объемную усадку (б) жаростойких сталей: 1 – 13,68% Cr; 2 – 17,72; 3 – 22,28; 4 – 25,68; 5 – 29,80; 6 – 35,83% Cr

кость сталей во многом зависит от их линейной усадки, поэтому характер кривых сохраняется таким же, как и для линейной усадки.

На качество отливок из высоколегированных сталей существенное влияние оказывает объемная усадка, зависящая от многих факторов: температуры и скорости заливки металла в формы, выделения газов, скорости и направленности охлаждения металла в форме, теплофизических свойств формовочных материалов и др.

Увеличение содержания хрома в сталях расширяет интервал кристаллизации, что в значительной мере ухудшает условия формирования качественных отливок.

Поскольку формы заливают расплавом преимущественно при одинаковых температурах, то время пребывания его в жидком состоянии с повышением содержания хрома увеличивается, а вместе с этим увеличивается и усадка металла в жидком состоянии и при кристаллизации. Увеличивается при этом и полная объемная усадка стали (рис. 2, б).

Расширение интервала кристаллизации и снижение теплопроводности сталей после повышения содержания в них хрома способствуют увеличению усадочных пор и концентрированной усадочной раковины (рис. 3).

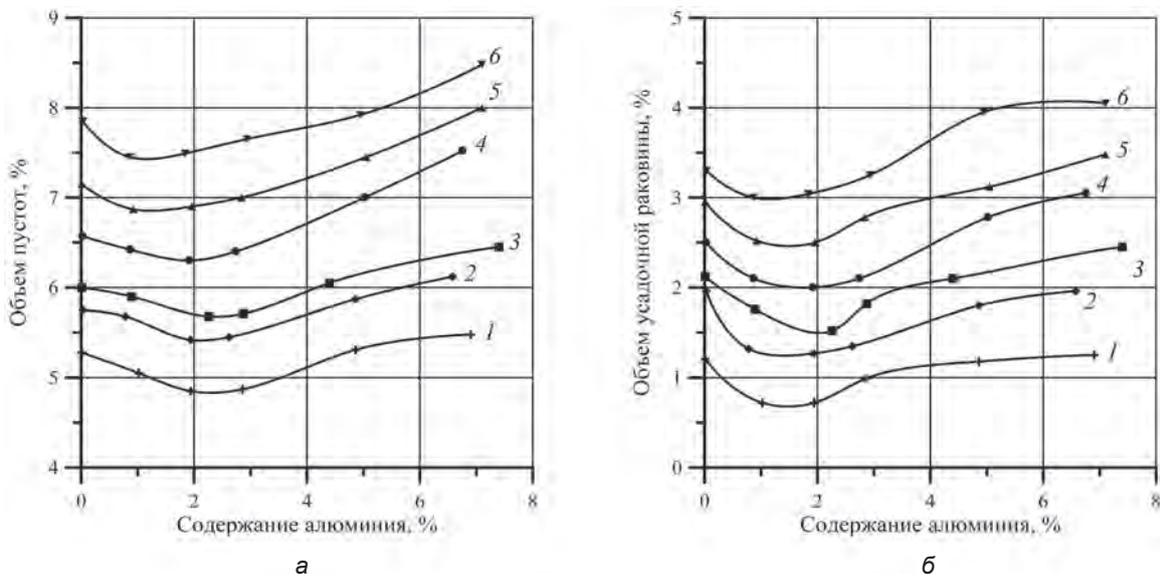


Рис. 3. Объем пустот (а) и раковин (б) в отливках из жаростойких сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия: 1 – 13,68% Cr; 2 – 17,72; 3 – 22,28; 4 – 25,68; 5 – 29,80; 6 – 35,83% Cr

Повышение содержания алюминия в хромистых сталях сопровождается значительным снижением их плотности. Алюминий имеет меньшую плотность ($2,71 \text{ г/см}^3$) в сравнении с железом ($7,86 \text{ г/см}^3$) и хромом ($7,16 \text{ г/см}^3$), растворяется в $\alpha\text{-Fe}$ до 30,0% и этим уменьшает плотность хромоалюминиевой стали. Например, увеличение содержания алюминия в 30%-ной хромистой стали от 0,01 до 7,10% снижает ее плотность с 7,57 до 6,80 г/см^3 .

Прочность сталей при высоких температурах зависит от величины зерна и состояния межзерновых прослоек. Границы зерен в литейном сплаве являются зонами накопления вредных примесей, в первую очередь легкоплавких, которые катастрофически ослабляют прочность связей между кристаллами при высоких температурах.

В тех случаях, когда границы зерен будут иметь высокую чистоту, а структура будет однородной, жаропрочность и жаростойкость стали будут максимальными.

Характеристики прочности высоколегированных сталей существенно зависят от неоднородности размеров зерен, т. е. от наличия в изделии одновременно мелких и крупных зерен. При высоких температурах в изделиях с разнотерной структурой возможно образование трещин на стыке крупных и мелких зерен.

Очевидно, что длительность эксплуатации жаростойких изделий будет тем выше, чем меньшая разница в размерах зерен.

Добавки алюминия в хромистую сталь существенно изменяют ее структуру. С увеличением в стали алюминия уменьшается количество мелких зерен, имеющих высокую микротвердость, и при добавках около 1,0% алюминия структура стали становится более однородной. На границах зерен наблюдаются лишь мелкие железохромистые карбиды. Количество неметаллических включений в стали вследствие раскисляющего действия алюминия уменьшается до минимума.

Увеличение содержания алюминия до 3,0% несколько укрупняет зерно феррита и повышает количество разной формы неметаллических включений в металле. Чрезмерные добавки алюминия (до 7,0%) снижают растворимость углерода в твердом растворе и способствуют образованию карбидов при более высоких температурах, что приводит к выделению их в виде цепочек на границах зерен.

Кроме того, такие добавки алюминия увеличивают количество неметаллических включений, также располагающихся на границах зерен, и повышают разнотерность стали вследствие неодинакового распределения нитридной фазы в объеме металла. Нитриды являются дополнительными центрами кристаллизации, поэтому их рассредоточение в расплаве обуславливает структуру стали.

Хром и алюминий вследствие управления структурой стали значительно изменяют ее механические свойства. Повышение концентрации хрома резко снижает прочность хромоалюминиевых сталей (рис. 4, а). Этому способствует увеличение количества карбидов и вредных примесей, а также их коагуляция. Укрупнение карбидов хрома, имеющих остроугольную форму, увеличивает количество концентраторов напряжений и снижает как прочность, так и пластичность стали. Хромистые и хромоалюминиевые стали имеют низкие пластичные свойства.

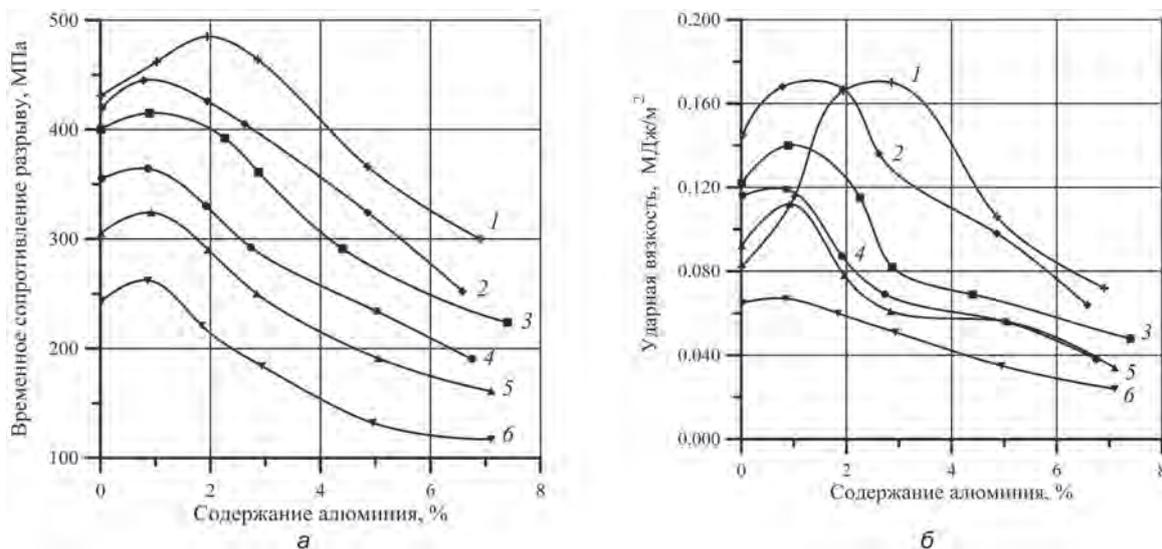


Рис. 4. Изменение прочности (а) и пластичности (б) жаростойких сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия: 1 – 13,68% Cr; 2 – 17,72; 3 – 22,28; 4 – 25,68; 5 – 29,80; 6 – 35,83% Cr

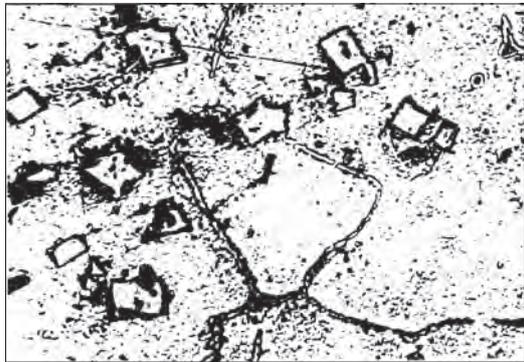


Рис. 5. Карбидные колонии в хромоалюминиевой стали (0,4% С; 30,7% Cr; 0,97% Al). $\times 100$

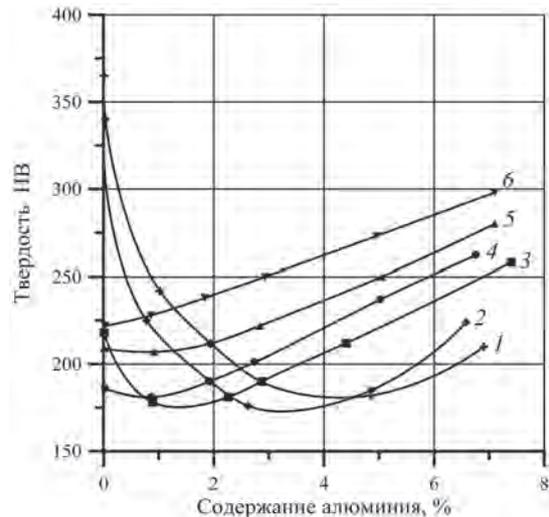


Рис. 6. Изменение твердости жаростойких сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия: 1 – 13,68% Cr; 2 – 17,72; 3 – 22,28; 4 – 25,68; 5 – 29,80; 6 – 35,83% Cr

Во время определения временного сопротивления разрыву и ударной вязкости имеет место хрупкое разрушение образцов практически без признаков пластической деформации. Наилучшая ударная вязкость сталей с содержанием около 13,0% хрома и 2,5% алюминия, имеющих в зависимости от содержания в них углерода мартенситную или мартенситно-ферритную структуру.

Повышение концентрации хрома значительно снижает ударную вязкость сталей (рис. 4, б) из-за крупнозернистой структуры, увеличения вредных примесей, карбидов и их коагуляции (рис. 5).

Стали с 13,0–14,0% хрома склонны к самозакалке, имеют мартенситную структуру и наивысшую твердость. Для улучшения обрабатываемости отливок из таких сталей на металлорежущих станках необходимо добавлять в металл алюминий, который резко уменьшает твердость (рис. 6).

Таким образом, на основании анализа изложенных выше свойств хромоалюминиевых сталей можно сделать вывод: наилучшего комплекса литейных и механических характеристик хромоалюминиевой жаростойкой стали можно достичь при содержании 25,0–32,0% хрома и 1,0–2,0% алюминия.

Исследованиями также установлено, что этот литейный материал имеет высокие окалиностойкость и термостойкость в различных газовых средах при температурах до 1250 °С (потери массы металла на окисление в среде перегретого воздуха до 1250 °С составляют 0,8–0,9 г/(м²·ч), а термостойкость достигает 70–75 циклов до разрушения режиме 400↔1000 °С).

Выводы

Содержание алюминия в хромистой стали определяется тем минимумом, при котором сохраняется достаточно высокая и длительная жаростойкость и тем максимумом, выше которого резко снижаются пластические свойства стали и температура ее плавления.

Очевидно, что изложенные результаты исследований были бы неполными без изучения влияния на свойства жаростойких сталей углерода и других химических элементов, улучшающих структуру и свойства металла, например, титана, редкоземельных металлов и др.

Литература

1. Корнилов И. И., Михеев В. С. Основные свойства и применение жароупорного железохромоалюминиевого сплава № 2. М.: Изд-во АН СССР, 1968. 8 с.
2. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургиздат, 1963. 600 с.
3. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1964. 672 с.
4. Ващенко К. И., Жук В. Я., Лютый В. А. Безникелевая жаростойкая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200 °С // Литейное производство. 1970. № 4. С. 28–32.
5. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. М.: Металлургиздат, 1948. 766 с.
6. Специальные стали: Учеб. для вузов / М. И Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. М.: МИСИС, 1999. 408 с.
7. Мескин В. С. Основы легирования стали. М.: Металлургия, 1964. 684 с.
8. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т., 2-е изд. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 736 с.

9. Шульте Ю. А. Производство отливок из стали. Киев; Донецк: Вища шк., 1983. 184 с.
10. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
11. Кубашевский О., Чопкин Б. Окисление металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1965. 315 с.
12. Архаров В. И. Окисление металлов. М.; Свердловск: Металлургиздат, 1945. 171 с.
13. Лютый В. А. Хромоалюминиевая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200 °С. Дис. ... канд. техн. наук. Киев: КПИ, 1969. 320 с.
14. Федоров Г. Е. Технологические свойства литейных жаростойких хромоалюминиевых сталей. Дис. ... канд. техн. наук. Киев: КПИ, 1977. 208 с.
15. Бабаскин Ю. З., Шипицин С. Я., Кирчу И. Ф. Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. Киев: Наукова думка, 2005. 372 с.
16. Кинцел А. Б., Русел Френкс. Высокохромистые нержавеющие и жароупорные стали. М.: Металлургиздат, 1945. 473 с.
17. Эмингер Э., Вебер К. Производство отливок из специальных сталей. М.: Машгиз, 1960. 160 с.

References

1. Kornilov I. I., Miheev V. S. *Osnovnye svoystva i primeneniye zharoupornogo zhelezohromoaluminievogo splava № 2* [Basic properties and application of heat resistant iron chromium aluminum alloy № 2.] Moscow, Publisher USSR Academy of Sciences Publ., 1968. 8 p.
2. Himushin F. F. *Nerzhavayushhie stali* [Stainless steels]. Moscow, Metallurgy Publ., 1963. 600 p.
3. Himushin F. F. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1964. 672 p.
4. Vashhenko K. I., Zhuk V. Ja., Ljutyj V. A. *Beznikelevaya zharostojkaja stal' dlja otlivok, rabotajushhih pri peremennyh temperaturah do 1200 °C.* [Nickel-free heat-resistant steel castings for working at various temperatures up to 1200 °C]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry*, 1970, no. 4, pp. 28–32.
5. Nehendzi Ju. A. *Stal'noe lit'e* [Steel castings]. Moscow, Metallurgy Publ., 1948. 766 p.
6. Gol'dshtejn M. I., Grachev S. V., Veksler Ju. G. *Special'nye stali: Uchebnik dlja vuzov* [Special steels]. Moscow, MISSIS Publ., 1999. 408 p.
7. Mes'kin V. S. *Osnovy legirovaniya stali* [Fundamentals of steel alloying]. Moscow, Metallurgy Publ., 1964. 684 p.
8. Gudremon Je. *Special'nye stali.* V 2-h tomah, 2-e izd [Special steels]. Moscow, Metallurgy Publ., 1966. Kn.1. 736 p.
9. Shul'te Ju. A. *Proizvodstvo otlivok iz stali* [Special steels]. Kiev-Donetsk, High School Publ., 1983. 184 p.
10. Zhuk N. P. *Kurs teorii korrozii i zashhity metallov* [Course in corrosion theory and protection of metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 472 p.
11. Kubashevskij O., Chopkins B. *Okisleniye metallov i splavov* [Oxidation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1965. 315 p.
12. Arharov V. I. *Okisleniye metallov* [Oxidation of metals]. Moscow-Sverdlovsk, Metallurgy Publ., 1945. 171 p.
13. Ljutyj V. A. *Hromoaluminievaya stal' dlja otlivok, rabotajushhih pri peremennyh temperaturah do 1200 °C.* *Diss. kand. tehn. nauk* [Hromoaluminievaya steel castings operating at various temperatures up to 1200 °C. Candidate of Technical Sciences diss.]. Kiev, 1969. 320 p.
14. Fedorov G. E. *Tehnologicheskie svoystva litejnyh zharostojkih hromoaluminievyyh stalej.* *Diss. kand. tehn. nauk* [Technological properties of heat-resistant cast aluminum chrome steels. Candidate of Technical Sciences diss.]. Kiev, 1977. 208 p.
15. Babaskin Ju. Z., Shipicin S. Ja., Kirchu I. F. *Konstrukcionnye i special'nye stali s nitridnoj fazoj* [Structural and special steels with nitrite phase]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2005. 372 p.
16. Kincel A. B., Rusel Frenks. *Vysokohromistye nerzhavayushhie i zharoupornye stali* [High-chromium stainless and heat resisting steels]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1945. 473 p.
17. Jeminger Je., Veber K. *Proizvodstvo otlivok iz special'nyh stalej* [Casting of special steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 160 p.

Сведения об авторах

Ямшинский Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, yamshinskiy@ukr.net, тел. + 380505460683.

Федоров Григорий Егорович, канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, fedorovge@ukr.net, тел. + 380679935601.

Information about the authors

Yamshinskiy Mikhail, Ph. D in Engineering, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Prospect Peremohy, 37, 03056 Kiev, Ukraine, yamshinskiy@ukr.net, tel. + 380505460683.

Fedorov Grigory, Ph. D in Engineering, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Prospect Peremohy, 37, 03056 Kiev, Ukraine, fedorovge@ukr.net, tel. + 380679935601.