

Л. Н. БУНИНА (Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь), И. П. ВОЛЧОК (ЗНТУ, Запорожье)

## ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ

Марганцеві сталі знаходять широке використання у машинобудуванні. В роботі досліджували вплив хімічного складу і форми неметалевих включень на конструкційну міцність марганцевих сталей. Наведено залежності між природою неметалевих включень і властивостями сталей.

*Ключові слова:* марганцеві сталі, модифікування, конструкційна міцність

Марганцевые стали широко применяются в машиностроении. В работе исследовали влияние химического состава и формы неметаллических включений на конструкционную прочность марганцевых сталей. Приводятся зависимости между природой неметаллических включений и свойствами стали.

*Ключевые слова:* марганцевые стали, модифицирование, конструкционная прочность

The manganese steels are widely used in machinery construction. The influence of chemical composition and form of non-metallic inclusions on constructive strength of manganese steels is studied. The dependences between the nature of non-metallic inclusions and properties of steels are given.

*Keywords:* manganese steels, modification, structural strength

Марганцевые стали (0,08...0,75 % С, 0,7...1,8 % Mn), благодаря невысокой стоимости и удовлетворительным механическим свойствам, находят широкое применение в машиностроении. Из низкоуглеродистых сталей этого класса типа 09Г2, 15Г и 20Г изготавливают детали автосцепных устройств и тележки грузовых вагонов, из среднеуглеродистых типа 25Г...40Г – корпуса поглощающих аппаратов грузовых вагонов, детали тормозных систем, коробок передач и редукторов в автотракторной промышленности, из высокоуглеродистых сталей 50Г...65Г – колеса и бандажи для железнодорожного транспорта, тормозные диски, пружины и рессоры для других видов транспорта.

В условиях столь широкого применения марганцевых сталей актуальной является задача повышения их конструкционной прочности – комплексной характеристики, включающей в себя показатели механической прочности (временное сопротивление, предел текучести и др.), эксплуатационной надежности (пластичность, хладостойкость, коэффициент интенсивности напряжений и др.) и долговечности (предел выносливости, коррозионная стойкость, коррозионно-усталостная прочность, износостойкость и др.).

Основными методами повышения конструкционной прочности являются: снижение в стали содержания неметаллических включений и газов, легирование, конечное раскисление (модифицирование), термическая, химико-термическая и термомеханическая обработки.

Из перечисленных методов наиболее дешевыми и легко вписывающимися в технологический процесс производства являются методы десульфурации и конечного раскисления (модифицирования), позволяющие снизить содержание неметаллических включений или уменьшить их отрицательное влияние путем изменения состава, формы и распределения в матрице стали.

Целесообразность и перспективность данного подхода подтверждаются работами ряда авторов, в том числе, И. А. Вакуленко и С. И. Губенко [1 – 3] с соавторами. Так, например, в работе [1] показано, что неметаллические включения, имеющие отличающуюся от металла кристаллическую структуру и, как правило, более низкий коэффициент термического расширения, являются концентраторами напряжений, способствуют зарождению и развитию усталостных трещин и ускоряют образование ряда дефектов (выщербин, поверхностных отколов, макротрещин и др.) в железнодорожных колесах. В работах [2, 3] исследованы микромеханизмы повреждаемости колесной стали, связанные с неметаллическими включениями, и показано, что они имеют различную природу: деформационные, термические и «водородные». При этом в условиях многократного термомеханического воздействия на поверхности качения колеса образуются продукты коррозии, которые вместе с неметаллическими включениями приводят к росту напряжений, зарождению и развитию дефектов.

**Цель настоящей работы** заключалась в повышении механических и служебных свойств марганцевых сталей. Экспериментальные плавки были проведены в индукционной печи емкостью 250 кг. В процессе плавки и фракционной разливки осуществляли раскисление стали 09Г, 40Г и 50Г по двум вариантам: 1) алюминием 0,1 % от массы жидкого металла и 2) алюминием 0,1 % и ферроцерием 0,15 % от массы жидкого металла (присадка в ковш). На плавке стали 60Г изучали влияние серы (присадка в печь) на механические свойства стали. Сталь разливали в сухие песчаные формы, получая слитки массой 25 кг и 50 кг. Из слитков и полученных из них методомковки при 1200...950 °С (степень укова 8,5...9,5) пластин изготавливали образцы для механических испытаний. Заготовки для образцов подвергались термической обработке: нормализации с 930 °С (сталь 09Г) и закалке с 890 °С (стали 40Г и 50Г) с последующим отпуском при 500 °С.

Независимо от конечного раскисления и горячей пластической деформации структура низкоуглеродистой стали после термической обработки представляла собой феррит с незначительным количеством карбидной фазы, сталей 40Г и 50Г – сорбит с игольчатыми включениями феррита (рис. 1). Неметаллические включения в литой стали при раскислении алюминием были представлены глиноземом и железо-марганцевыми сульфидами III-го типа. Последние при ковке деформировались, приобретая веретенообразную форму, при этом параметр их формы (отношение длины к ширине) составлял 7...10; РЗМ-содержащие включения практически не изменяли своей формы (рис. 2).

Анализ микромеханизма разрушения на приставке к микроскопу [4] показал, что деформированные включения сульфидов в большей мере способствовали зарождению и развитию микротрещин, чем недеформирующиеся глобулярные включения в стали с РЗМ (см. рис. 2). Этот вывод подтверждается результатами механических испытаний. Как видно из представленных в табл. 1 данных, наиболее высокие показатели прочности, пластичности и ударной вязкости были получены на продольных образцах, наиболее низкие на поперечных и литых. При этом комплексное раскисление стали обеспечило в результате глобуляризации неметаллических включений повышение коэффициента анизотропии механических свойств в среднем с 0,85 до 0,92.

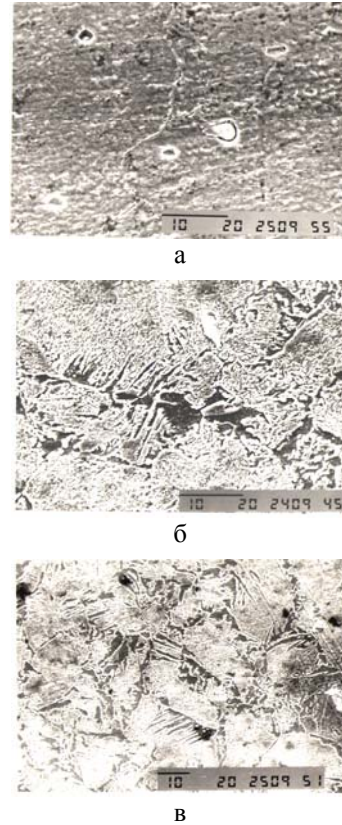


Рис. 1. Микроструктуры сталей 09Г (а), 40Г (б) и 50Г (в) после термообработки

Одним из важных показателей конструктивной прочности стали является ее сопротивление разрушению под действием циклических нагрузок. В настоящее время для описания поведения сплавов, работающих в таких условиях, широко применяются методы линейной механики разрушения, рассматривающие коэффициент интенсивности напряжений КИН как основной фактор, контролирующий скорость роста усталостных трещин. Получаемые при этом кинетические диаграммы усталостного разрушения в координатах скорость роста трещины  $v$ , м/цикл – размах КИН  $\Delta K$ , МПа·м<sup>1/2</sup>, дают информацию о сопротивлении материала распространению усталостных трещин в зависимости от условий нагружения [5]. При этом в качестве основных критериев, характеризующих сопротивление усталостному разрушению принимают значения (размахи) коэффициентов интенсивности напряжений в устье трещины: пороговое значение размаха КИН  $\Delta K_{th}$ , ниже которого трещина не растет (порог усталости); критическое значение размаха КИН  $\Delta K_{fc}$ , выше которого трещина теряет стабильность и начинает спонтанно развиваться, а также промежуточное значение КИН  $\Delta K^*$ . В нашем случае значения  $\Delta K_{th}$ ,  $\Delta K^*$  и  $\Delta K_{fc}$  определены соответственно при значениях  $v$ , равных 10<sup>-5</sup>, 10<sup>-7</sup> и 10<sup>-9</sup> м/цикл.

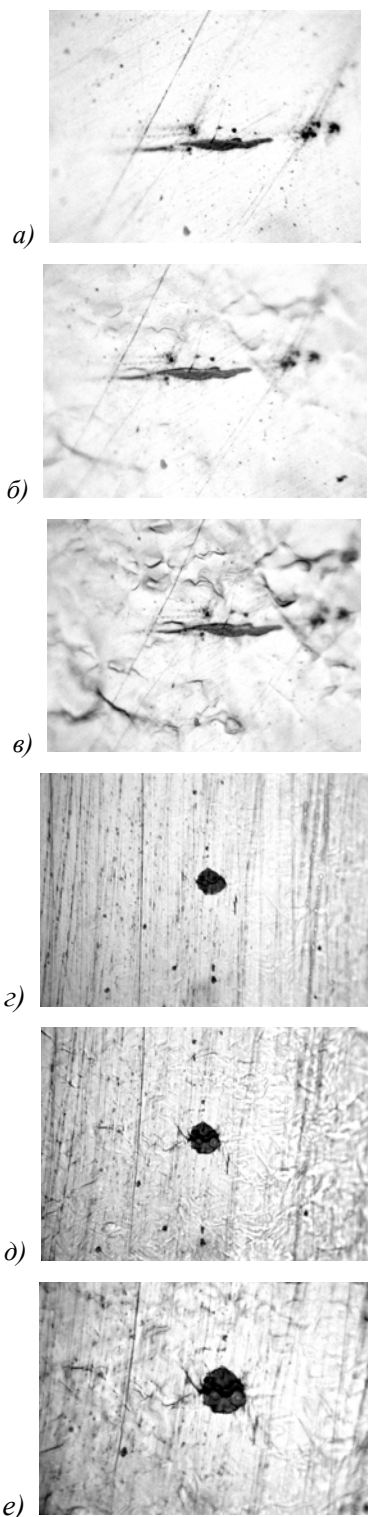


Рис. 2. Зарождение микротрещин,  $\times 900$ :  
 а, б – возле железо-марганцевых сульфидов;  
 в, д, е – возле окисульфидов РЗМ

Представленные в табл. 2 результаты испытаний свидетельствуют о более высоких в среднем значениях  $\Delta K_{th}$  стали 09Г по сравнению со сталью 50Г, что можно объяснить более высокой пластичностью и ударной вязкостью низкоуглеродистой стали (см. табл. 1). Влияние конечного раскисления на показатели  $\Delta K_{th}$  и

$\Delta K^*$  не установлено. Циклическая вязкость разрушения  $\Delta K_{fc}$  оказалась достаточно зависимой от структуры испытываемых сталей и от природы неметаллических включений: при всех технологических вариантах производства сталь 50Г на 15...40 % превосходила сталь 09Г по величине  $\Delta K_{fc}$ . Показательно, что комплексное раскисление обеих марок стали дало возможность устранить анизотропию по всем показателям циклической вязкости разрушения.

Малоцикловая выносливость  $N$  (число циклов до разрушения) характеризует сопротивление материала разрушению в условиях упруго-пластических деформаций. Этот вид испытаний проводили на сталях 09Г и 40Г методом плоского изгиба с постоянной величиной деформации  $\varepsilon = 0,35\%$  на установке ИП-2 конструкции ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины. Сопоставление представленных в табл. 2 результатов испытаний с данными табл. 1 позволяет сделать вывод о наличии достаточно четкой зависимости между долговечностью  $N$ , с одной стороны, и пластичностью и ударной вязкостью, с другой. Наличие такой зависимости объясняется «жесткой» схемой нагружения, при которой задается величина деформации, а не величина напряжений. Комплексное модифицирование алюминием и РЗМ привело не только к повышению долговечности сталей, но и к заметному уменьшению анизотропии по этому показателю.

Коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , характеризующий поле напряжений перед распространяющейся трещиной, определяли на плоских образцах 4-го типа длиной 110 мм, сечением  $10 \times 20$  мм, с боковым надрезом и трещиной методом сосредоточенного изгиба в соответствии с ГОСТ 25.506-85. В отличие от  $N$ , с ростом в исследуемых сталях содержания углерода наблюдалось повышение  $K_{Ic}$  (см. табл. 2). Повышению этого показателя также способствовала глобуляризация неметаллических включений в результате комплексного модифицирования стали.

Существующими стандартами содержание серы в рядовых конструкционных сталях допускается до 0,03...0,05 %. Поэтому в спокойных раскисленных алюминием сталях, содержащих 0,003...0,005 % кислорода, соотношение между оксидами и сульфидами равно приблизительно 1:10, т.е. основным видом включений являются железо-марганцевые сульфиды. Как известно, эти включения деформируются при пластической деформации, вызывая снижение и анизотропию свойств стали. Поэтому пер-

спективным методом повышения свойств стали следует рассматривать сочетание десульфурации и комплексного раскисления с целью гло-

буляризации оксисульфидных включений и повышения механических и служебных свойств стальных изделий.

Таблица 1

**Механические свойства и коэффициент анизотропии опытных сталей**

Марка стали, раскисление	Вариант	Тип образца, коэф. анизотропии	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
09Г, Al	11Л	литой	256	328	18,7	0,41
	11Пр	продольный	260	335	24,1	0,46
	11П	поперечный	214	264	19,6	0,33
	-	А	0,82	0,79	0,81	0,72
09Г, Al+PЗМ	12Л	литой	296	347	20,2	0,50
	12Пр	продольный	308	360	22,3	0,59
	12П	поперечный	272	316	21,8	0,54
	-	А	0,88	0,88	0,98	0,91
40Г, Al	31Л	литой	559	624	12,1	0,19
	31Пр	продольный	560	645	13,9	0,23
	31П	поперечный	526	620	12,0	0,16
	-	А	0,94	0,96	0,86	0,70
40Г, Al+PЗМ	32Л	литой	532	632	13,3	0,21
	32Пр	продольный	568	640	14,6	0,28
	32П	поперечный	539	698	13,7	0,23
	-	А	0,95	0,98	0,94	0,82
50Г, Al	41Л	литой	674	755	7,9	0,16
	41Пр	продольный	685	770	9,7	0,18
	41П	поперечный	645	715	8,4	0,15
	-	А	0,94	0,93	0,86	0,83
50Г, Al+PЗМ	42Л	литой	672	780	8,9	0,20
	42Пр	продольный	665	805	9,5	0,22
	42П	поперечный	660	775	9,3	0,18
	-	А	0,99	0,96	0,98	0,82

Изучали влияние содержания серы и раскисления алюминием и ферроцерием на механические свойства стали 60Г (0,62 % С, 0,94 % Mn, 0,37 % Si, 0,027 % Р). Сталь выплавляли в 250-кг индукционной печи на чистой по сере шихте (армко-железо и сталь 08кп). Серу присаживали в печь, раскислители – в разливочный ковш. Присадка алюминия составляла 0,1 % от массы жидкого металла, присадка ферроцерия рассчитывалась, исходя из ожидаемого (по расчету шихты) содержания серы в стали по формуле: % FeSe = 4 % S [4]. Образцы для механических испытаний изготавливали из литого и ковального металла (слитки массой 25 кг, степень укова 8,5...9,5). Закалку в масло с 810 °С проводили после нагрева заготовок в печах сопротивления, отпуск – при 500 °С с охлаждением на воздухе.

Представленные на рис. 3 результаты механических испытаний согласуются с данными других авторов [6 – 8] и подтверждают эффективность комплексного подхода – десульфурации и раскисления алюминием совместно с ферроцерием на механические свойства литой и деформированной стали. Из представленных на рисунке результатов следует, что содержание серы и технология конечного раскисления не оказали заметного влияния на предел текучести, временное сопротивление и твердость стали. В то же время, исследуемые технологические факторы изменяли показатели пластичности и ударной вязкости в широких пределах, при этом снижение содержания серы в целом оказалось более эффективным, чем дополнительное раскисление стали ферроцерием.

**Коэффициенты интенсивности напряжений КДUR, малоцикловая долговечность  
и  $K_{1C}$  сталей 09Г и 50Г**

Марка стали	Вариант по табл. 1	$\Delta K_{th}$	$\Delta K^*$	$\Delta K_{fc}$	$N$	$K_{1C}$
		МПа·м <sup>1/2</sup>			тыс. цикл.	МПа·м <sup>1/2</sup>
09Г	11Пр	13	21	70	10,6	45,1
	11П	13	20	60	6,0	39,0
	12Пр	14	22	80	10,9	66,5
	12П	14	22	80	8,6	60,1
50Г	41Пр	12	23	89	8,8*	65,0
	41П	12	22	70	5,8*	54,8
	42Пр	8,3	20	91	9,0*	86,6
	42П	8,3	20	91	8,2*	76,8

\* – Испытания проведены на стали 40Г

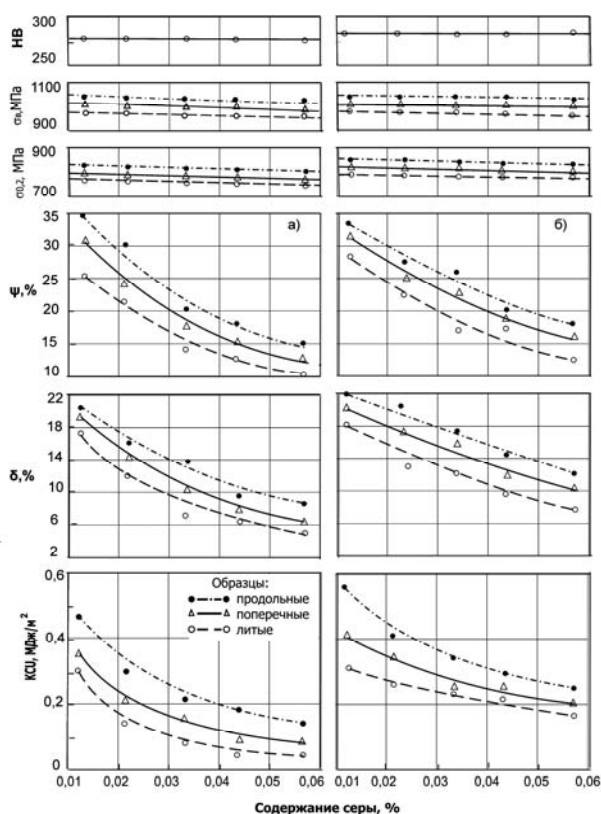


Рис. 3. Влияние серы и раскисления на механические свойства стали 60Г:  
а – алюминием; б – ферроцерием

В заключение необходимо отметить, что применение двухкомпонентного конечного раскисления взамен однокомпонентного алюми-

ем на одном из металлургических предприятий позволило уменьшить количество выделений нитридов алюминия на границах аустенитных зерен, избежать образования легкоплавких железо-сульфидных эвтектик и в результате существенно снизить брак слитков и поковок по «горячим» трещинам [9].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефекти залізничних коліс [Текст] : монографія / І. О. Вакуленко [та ін.]. – Д.: Вид-во Маковецький Ю. В., 2009. – 112 с.
2. Gubenko, S. Influence of nonmetallic inclusions on microbreaks formation in wheel steel and railway wheels [Text] / S. Gubenko [et al.] // Transport problems. – 2008. – том 3, zeszyt 3. – P. 77-81.
3. Gubenko, S. I. System study of wear mechanism of railway wheel tread surface [Text] / S. I. Gubenko, S. I. Pinchuk, E. V. Belaya // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – vol. 2, No. 1. – P. 51-56.
4. Волчок, И. П. Сопротивление разрушению стали и чугуна [Текст] / И. П. Волчок. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
5. Вплив неметалевих включень на опір втомного руйнуванню марганцевистих сталей [Текст] / І. Андрійко [та ін.] // Машинознавство. – 2007. – № 4. – С. 13-16.
6. Шульте, Ю. А. Хладостойкие стали [Текст] / Ю. А. Шульте. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.

7. Лунев, В. В. Сера и фосфор в стали / В. В. Лунев, А. В. Аверин. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
8. Голубцов, В. А. Модифицирование стали для отливок и слитков [Текст] / В. А. Голубцов, В. В. Лунев. – Челябинск-Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
9. Бунина, Л. Н. Влияние неметаллических включений на трещиностойкость слитков и поковок

[Текст] / Л. Н. Бунина, И. П. Волчок // Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах: міжн. наук.-техн. конф. (19-22 вересня 2006 р.) : зб. матеріалів. – Запоріжжя, 2006. – С. 61-63.

Поступила в редколлегию 20.04.2011.

Принята к печати 26.04.2011.