

УДК 620.175.2

Т.В. НОСОВА¹, А.В. КАЛИНИН²

¹Днепропетровский национальный университет им. Олесь Гончара,
²Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
Днепропетровск, Украина

УПРОЧНЕНИЕ КРЕМНИЙМАРГАНЦОВИСТЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Проведена обработка расплавов конструкционных Si-Mn-сталей комплексными модификаторами на основе промышленных отходов титана, алюминия, стали. Модификатор вводим в виде прессованных брикетов. Проведена горячая деформация литых заготовок, получены кованные заготовки сталей 16ГС, 17ГС и St.52.3. Исследована структура сталей в исходном состоянии и после модифицирования. Достигнута однородность структуры и измельчение зерна модифицированных сталей. В результате модифицирования повышен комплекс механических свойств Si-Mn-сталей, прочностные характеристики увеличены в среднем на 20-33%, ударная вязкость на 26-66%, улучшены технологические свойства деформированных заготовок. Разработаны механизмы упрочнения Si-Mn-сталей в результате модифицирования и горячей деформации: твердорастворное, зеренное, деформационное, дисперсионное. Приведены расчетные формулы, доказывающие степень упрочнения сталей.

Ключевые слова: кремниймарганцевистая сталь, модификатор, расплав, деформация, структура, свойства.

Введение

Одним из важнейших направлений развития ракетно-космической техники является разработка новых и усовершенствование существующих конструкционных материалов с повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств. Для изготовления трубопроводов, платформ для запуска ракетно-космических аппаратов применяются низколегированные коррозионностойкие конструкционные стали [1-3]. Одной из проблем повышения качества сталей этого класса является уменьшение влияния ликвации, формируемой при кристаллизации, на свойства готовых изделий. Трудность проблемы состоит не только в уменьшении количества вредных примесей, но и в разработке научных положений получения высокой стабильности состава, структуры и свойств литых и деформированных заготовок для повышения их конкурентоспособности на мировом рынке [4].

Перспективным направлением улучшения качества и свойств конструкционных сталей является модифицирование, заключающееся в обработке расплавов различными модифицирующими добавками, в том числе содержащими промышленные отходы титана, алюминия и других компонентов [6].

В настоящее время к кремниймарганцевистым сталям предъявляются высокие

требования по конструктивной прочности и технологичности. Эти требования бывают достаточно противоречивыми, поэтому изучение сталей ответственного назначения является актуальной задачей.

Постановка задачи

Задача работы – повышение уровня и стабильности механических свойств конструкционных сталей в литом, деформированном и термообработанном состоянии при обработке расплавов комплексными модификаторами.

Материалом исследования служили низколегированные кремниймарганцевые стали 16ГС, 17ГС и St.52.3, применяемые для газо-, нефтепроводов, а также трубопроводов и сварных конструкций ракетно-космической техники. Средний химический состав исследуемых Si-Mn-сталей, % мас: С – 0,12...0,18; Si – 0,4...0,7; Mn – 0,9...1,2; Cr < 0,3; Ni < 0,3; S < 0,04; P < 0,03.

С целью улучшения структуры, повышения комплекса механических свойств заготовок, проведено модифицирование расплавов разработанными комплексными добавками, содержащими алюминиевую, стальную и титановую стружку [5]. Модификатор вводили в виде спрессованных брикетов. Модифицирующие добавки производили как рафинирующее, так и модифицирующее действие.

Результаты исследований и их обсуждение

При деформации литых заготовок сталей с ферритно-перлитной структурой происходит процесс дробления литой структуры и появление волокнистости. Величину деформации оценивали коэффициентом укова: $\lambda = F_0 / F_k = H / h$, где F_0 и F_k – площади поперечного сечения до и послековки; H и h – начальная и конечная высота заготовки. При нескольких операцияхковки общий коэффициент укова составлял: $\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_n$. Для устранения литой структуры коэффициент укова должен быть больше 2...10. Известны основные направления изменения микроструктуры, приводящие к повышению прочности стали. В наиболее общем виде они описаны в работах [7-9]. Установлено, что при модифицировании конструкционных кремниймарганцовистых сталей и последующей горячей деформации имеют место следующие виды упрочнения:

Твердорастворное упрочнение за счет растворения легирующих элементов марганца и кремния в феррите. Упрочнение может быть просуммировано по уравнению:

$$\sum \sigma_{\text{тв.р.}} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot C_i, \quad (1)$$

где K_i – коэффициент упрочнения феррита;
 C_i – концентрация элемента в феррите.

Зеренное упрочнение в результате измельчения первичного зерна δ -феррита и зерна аустенита за счет образования новых центров кристаллизации на основе дисперсных карбидных фаз. Упрочнение определяется размером зерна феррита:

$$\sigma_3 = K_y \cdot d^{-1/2}, \quad (2)$$

где K_y – коэффициент упрочнения;
 d – размер зерна феррита.

Структурное упрочнение за счет увеличения количества перлита, связанное с повышением

устойчивости переохлажденного аустенита за счет модифицирующих добавок (титана и алюминия).

Дисперсионное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{д.у.}}$) структурных составляющих за счет тугоплавких и дисперсных карбидов титана и алюминия, образовавшихся при обработке расплава модификатором. Этот вид упрочнения связан не только с упрочняющим эффектом самих частиц, но и взаимодействием их с дислокациями.

Упрочнение за счет дисперсных частиц $\Delta\sigma_{\text{д.у.}}$ в сталях подсчитывается по формуле:

$$\Delta\sigma_{\text{д.у.}} = \frac{\Phi G b}{2\pi(\lambda - 2r)}, \quad (3)$$

где r – радиус частицы;

λ – расстояние между центрами частиц;

Φ – коэффициент взаимодействия дислокаций с частицами ($\Phi = 1,25$);

G – модуль сдвига;

b – вектор Бюргера.

Деформационное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{д.}}$) в результате повышения плотности дислокаций, которое определяется зависимостью:

$$\Delta\sigma_{\text{д.}} = \alpha m G b \rho^{1/2}, \quad (4)$$

где α – коэффициент характера взаимодействия дислокаций при деформационном упрочнении;

m – ориентационный множитель ($m = 2,75$);
 $\alpha m = 0,5$;

G – модуль сдвига ($G_{\text{Fe}} = 84000$ МПа);

b – вектор Бюргера железа ($b = 0,25$ нм);

ρ – плотность дислокаций.

Таким образом, совместное действие нескольких механизмов упрочнения можно определить, используя принцип Е. Орована по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{т.}} = \Delta\sigma_{\text{тв.р.}} + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_{\text{п.}} + \Delta\sigma_{\text{д.у.}} + \Delta\sigma_{\text{д.}}, \quad (5)$$

Исходя из полученных данных и оценивая вклад каждого механизма в предел текучести, можно определить суммарную величину предела текучести модифицированных сталей после горячей деформации (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика предела текучести сталей после модифицирования и деформации

Виды упрочнения	Расчетная формула упрочнения	Доля упрочнения в пределе текучести, %	Компоненты, увеличивающие упрочнение
Твердорастворное, $\Delta\sigma_{\text{тв.р.}}$	$\Delta\sigma_{\text{тв.р.}} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot C_i$	25...40	Mn, Si (в растворе)
Зеренное, $\Delta\sigma_3$	$\Delta\sigma_3 = K_y \cdot d^{-1/2}$	30...40	Ti, Al (в карбидах)
Структурное, $\Delta\sigma_{\text{п.}}$	$\Delta\sigma_{\text{п.}} = K_{\text{п.}} \cdot \Delta\Pi$	5...15	Ti, Al, Ca (в растворе)
Дисперсионное, $\Delta\sigma_{\text{д.у.}}$	$\Delta\sigma_{\text{д.у.}} = \frac{\Phi G b}{2\pi(\lambda - 2r)}$	20...25	Ti, Al, N (в нитридах)
Деформационное, $\Delta\sigma_{\text{д.}}$	$\Delta\sigma_{\text{д.}} = \alpha \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$	3...5	обжатие

Основными видами упрочнения ферритно-перлитных конструкционных сталей являются твердорастворное, зеренное и дисперсионное. При этом дисперсионное упрочнение вызывает упрочнение не только за счет собственного вклада, но и косвенного воздействия на зеренное упрочнение путем измельчения зерна.

Таким образом, из указанных механизмов упрочнения, воздействующих на исследуемые стали с различной микроструктурой, можно

выделить доминирующий механизм, определяющий эффективность эксплуатации металлических конструкций. В конструкционных сталях с ферритно-перлитной структурой – это механизм зернограницного и дисперсионного упрочнения, которые проявляются в значительной степени в сталях после модифицирующей обработки.

Результаты механических испытаний образцов исходных и модифицированных сталей марок 16ГС и 17ГС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние модифицирования и деформации на механические свойства конструкционных сталей

Марка стали	Состояние стали	Механические свойства				
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
16ГС	Исходная	524	421	17,3	43,2	0,46
	Модифицированная	576	508	19,7	56,7	0,58
17ГС	Исходная	615	434	16,1	29,7	0,32
	Модифицированная	639	541	17,6	33,8	0,51

Из таблицы следует, что модифицированные стали послековки имеют более высокий комплекс прочностных и пластических свойств: $\sigma_{\text{в}}$ повышен на 10...21%; $\sigma_{\text{т}}$ – на 20,7...33,8%; увеличен на 13,9...25,8%; δ – на 30%; повышение КСУ составило от 26...66%.

Заключение

Проведена обработка расплавов конструкционных Si-Mn-сталей комплексными модификаторами на основе промышленных отходов титана, алюминия, стали. В результате модифицирования повышен комплекс механических свойств Si-Mn-сталей, прочностные характеристики увеличены в среднем на 20-33%, ударная вязкость на 26-66%, улучшены технологические свойства деформированных заготовок. Разработаны механизмы упрочнения Si-Mn-сталей в результате модифицирования и горячей деформации: твердорастворное, зеренное, деформационное, дисперсионное. Приведены расчетные формулы, доказывающие степень упрочнения сталей.

Литература

1. Горынин И. В. Проблемы выбора материалов и технологии сварки при строительстве ледостойких платформ [Текст] : монография / И. В. Горынин, Л. В. Грищенко, В. А. Легостаев. – М. : Машиностроение. - 1977. – С. 120-134.
2. Патон Б. Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций [Текст] / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2000. – №9. – С. 3-14.

3. Тимошенко В. И. Расчетно-методическое обеспечение наземной отработки жидкостной реактивной системы управления движением III ступени РКН «Циклон-4» [Текст] / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. М. Дурраченко // Тр. Космическая техника. Ракетное вооружение. – Д. : Днепропетровск. - 2015. – Вып.3. – С. 3-6.

4. Карабасов Ю. С. Сталь на рубеже столетий [Текст] : монография / под. ред. Ю. С. Карабасов. – М. : МИСИС. - 2001. – 664 с.

5. Декл. пат. 5321. Заявл. Украина, Комплексная добавка для обработки сталей [Текст] / О. М. Шаповалова, А. В. Шаповалов, А. В. Калинин. – ДНУ. - №2004010031; заявл. 09.11.2004; опубл. 10.05.2005, Бюл. №3. – 5 с.

6. Банных В. И. Машиностроение. Стали и чугуны [Текст] : Т.2. энциклопедия / В. И. Банных. - М. : Машиностроение. - 2001. - С. 186-193.

7. Владимиров В. И. Физическая теория пластичности и прочности [Текст] : монография / В. И. Владимиров. – Л. : ЛПИ. – 1985. – 172 с.

8. Мешков Ю. Я. Прочность как основа конструкционной надежности сталей и сплавов [Текст] / Ю. Я. Мешков // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА. - Вып. 80. – Днепропетровск, 2015. – С. 204-210.

9. Матросов Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов [Текст] / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвененко, С. А. Голваненко. – М. : Металлургия. - 1989. – 289 с.

Поступила в редакцию 12.05.2016

Т.В. Носова, О.В. Калінін. Зміцнення кремніймарганцевістих модифікованих сталей при гарячій деформації

Проведено обробку розплавів конструкційних Si-Mn-сталей комплексними модифікаторами на основі промислових відходів титану, алюмінію, сталі. Модифікатор вводимо у вигляді пресованих брикетів. Проведена гаряча деформація литих заготовок, отримані ковани заготовки сталей 16ГС, 17ГС і St.52.3. Досліджено структуру сталей в початковому стані і після модифікування. Досягнуто однорідність структури і подрібнення зерна модифікованих сталей. В результаті модифікування підвищено комплекс механічних властивостей Si-Mn-сталей, міцнісні характеристики збільшені в середньому на 20-33%, ударна в'язкість на 26-66%, поліпшені технологічні властивості деформованих заготовок. Розроблено механізми зміцнення Si-Mn-сталей в результаті модифікування і гарячої деформації: твердорозчинне, зеренне, деформаційне, дисперсійне. Наведено розрахункові формули, які доводять ступінь зміцнення сталей.

Ключові слова: кремніймарганцева сталь, модифікатор, розплав, деформація, структура, властивості.

T.V. Nosova, A.V. Kalinin. Hardening of silicomanganes modified steel during hot deformation

Spend the processing of melts structural Si-Mn-steel complex modifiers based on industrial waste of titanium, aluminum, steel. We are introducing a modifier in the compressed briquettes. Spend the hot deformation of the cast blanks, obtained forged billet steel 16GS, 17GS and St.52.3. The structure of the steel studied in the initial state and after the modification. Reached uniformity of structure and grain refinement modified steels. As a result of modifying the mechanical properties of the complex increased Si-Mn-steels, strength properties increased on average by 20-33%, the toughness at 26-66%, improved processing properties of the deformed blanks. Mechanisms for strengthening Si-Mn-steels as a result of the modification, and hot deformation: solid solution, grain deformation, dispersion. Results the formulas to prove the degree of hardening of steels.

Keywords: silicomanganes steel, modifier, melt, deformation, structure, properties.