



It is shown that steel 78GMFS depending on content in its composition of molybdenum can be used for replacement of carbon steels of type U7A-Y10A, instrumental steels of type 9HS, 8HF and also at creation of new instrumental steels.

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МОЛИБДЕНА В СОСТАВЕ СТАЛИ 78ГМФС НА ЕЕ ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ И СВОЙСТВА

В результате проведенных исследований [1] была разработана и использована для изготовления различного вида инструмента сталь 78ГМФС (ТУ14-840-20-92 «Прокат из легированной стали для штампового инструмента), имеющая следующий химический состав (мас. %): углерод — 0,7–0,85, марганец — 0,35–0,60, кремний — 0,5–0,8, молибден — 0,2–0,3, ванадий — 0,06–0,12, алюминий — 0,03–0,08. Базовой для разработки стали 78ГМФС явилась сталь У7А — У8А [2]. Результатом создания стали 78ГМФС стало значительное повышение прокаливаемости и механических свойств стали: при закалке в масло критический диаметр равен 45–50 мм, в воду — 85–90 мм, отпускостойчивость — 59 HRC₃ после отпуска при 250 °С (3 ч); механические свойства после закалки и отпуска при 350 °С: $\sigma_b \geq 1850$ МПа, HRC₃ $\geq 53,5$, $\delta \geq 8\%$, $\psi \geq 25\%$, KCU $\geq 0,4$ МДж/м². При рабочей твердости стали 78ГМФС 61–63 HRC₃ ударная вязкость составляет KCU = 0,28–0,32 МДж/м².

Положительный эффект для свойств новой марки стали достигнут за счет одновременного введения в ее состав по сравнению с маркой У8А в небольших количествах алюминия (~0,03–0,06%), молибдена (~0,2–0,3%) и ванадия (0,06–0,12%), а также увеличением содержания кремния (~0,5–0,8%) и марганца (~0,5–0,6%). Эта сталь может быть отнесена к инструментальным сталям перлитного класса: ~0,8% углерода и ~1% легирующих элементов.

Как известно, легирующие элементы в зависимости от взаимодействия с основными компонентами стали (железом и углеродом) по-разному распределяются в структуре и оказывают различное влияние на полиморфизм железа, критические точки при нагревании, карбидообразование, изотермическое превращение аустенита и мартенситное превращение. В стали легирующие элемен-

ты могут находиться в свободном состоянии, растворяться в железе, в форме интерметаллических соединений с железом либо в виде раствора в цементите или самостоятельных карбидов.

Введение в состав стали У8А алюминия в количестве 0,03–0,06% влияет на величину вторичного зерна аустенита, что непосредственно связано с наличием в структуре субмикроскопических частиц нитридов алюминия [3]. Для регулирования роста аустенитного зерна в стали алюминий принято вводить в ковш после раскисления ее ферромарганцем и ферросилицием перед самой разливкой стали в изложницы, чтобы не происходило образование алюмосиликатов.

Сильное воздействие ванадия на свойства стали в значительной степени определяется его влиянием на природу, размер и характер распределения образующейся карбидной фазы. Рекомендуемые содержания ванадия в стали обычно составляют от 0,03 до 0,3%. Поэтому при легировании сталей в зависимости от их назначения очень важно выбрать оптимальное содержание этого элемента в составе, чтобы максимально повысить прочность стали, не снижая сильно пластичность. Упрочнение стали ванадием обусловлено выделением дисперсных частиц карбида (карбонитрида) ванадия, образующихся при выплавке стали и ее последующем переделе и термической обработке [4]. При малом содержании ванадия (~0,1%) в стали 78ГМФС образующиеся нитриды и карбиды ванадия являются зародышами образования зерен аустенита при охлаждении из жидкого состояния, а также, выделяясь по границам, барьерами, препятствующими росту зерна аустенита при проведении ее последующего нагрева выше точки A_{с3} как при деформации, так и при закалке [5]. Таким образом, присутствие ванадия в таком

количестве в составе стали способствует измельчению зеренной структуры, уменьшает чувствительность к перегреву и улучшает износостойкость [6].

Кремний относят к группе легирующих элементов, которые задерживают образование цементита при низком отпуске (выше 200 °С) закаленных на мартенсит сталей, что способствует повышению отпускостойчивости стали и стабилизации ε-карбидов [7]. Таким образом, повышается отпускостойчивость стали 78ГМФС, что весьма необходимо для сталей с содержанием углерода ~0,7–0,8%. По данным [8], кремний также способствует повышению пластичности α-твердого раствора углеродистых сталей.

Применение молибдена в качестве легирующего элемента в инструментальных сталях с присутствием хрома в разных количествах основано на повышении их закаливаемости, отпускостойчивости, прочности, износостойкости и ударной вязкости [3, 6, 9, 10]. Молибден, хотя и считается сильным карбидообразующим элементом, при содержании его в составе стали до 2% в малой степени влияет на характер распределения избыточных карбидов, усиливает дисперсионное твердение при высоком отпуске и значительно повышает сопротивление смятию. Исследования сложнолегированных сталей при наличии в их составе хрома и никеля показали, что добавка в их состав около 0,25% молибдена повышает прокаливаемость на 25%. Резкое увеличение прокаливаемости хромистых сталей с введением в их состав молибдена происходит не только из-за влияния его на свойства твердого раствора, но главным образом определяется влиянием той части молибдена, которая непосредственно связана в карбидной фазе. При введении молибдена в сталь, содержащую хром, значительная часть молибдена переходит в карбидную фазу, вытесняя из нее хром [11]. Вытесненные атомы хрома

переходят в твердый раствор, дополнительно легируя его, т.е. повышается устойчивость аустенита, следовательно, увеличивается прокаливаемость и уменьшается химическая микронеоднородность твердого раствора из-за снижения концентрации хрома вблизи карбидных частиц.

А каково поведение и значение молибдена в углеродистой бесхромистой стали? В работе [12] приведено изотермическое (для 20 °С) сечение части тройной диаграммы-состояния Fe–Mo–C при изменении содержания молибдена от 0 до 16% и углерода от 0 до 1,2%. При увеличении содержания молибдена до 1% в структуре перлита углеродистой стали с 0,7–0,8% углерода при температуре 20 °С он в основном должен присутствовать в твердом растворе и карбиде (Fe, Mo)₃C. Установлено, что молибден в данном случае резко снижает скорость зарождения и роста перлитных зерен при перлитном превращении: 0,32% Мо в стали уменьшает скорость зарождения на три порядка. При мартенситном превращении молибден тормозит превращение аустенит → мартенсит, понижая точку начала мартенситного превращения ($M_{\text{н}}$), тем самым давая возможность использования в качестве закалочной среды «масло» вместо «вода – масло».

Ранее было показано [3], что сталь с наличием добавки молибдена после улучшения характеризуется волокнистым изломом, а после упрочнения по схеме закалка + низкий отпуск отличается более высокими значениями ударной вязкости из-за подавления процессов выделения специальных карбидов по границам зерен во время охлаждения при закалке и низком отпуске.

Для стали 78ГМФС рассматривали случаи ее легирования молибденом в количественных пределах 0,2–0,25%, 0,4–0,5, ~0,7 и ~1% (табл. 1) и исследовали твердость и ударную вязкость после проведения выплавки, отжига и термического упрочнения.

Таблица 1. Химический состав стали 78ГМФС с различным содержанием молибдена

Номер опытных плавок	Содержание легирующих элементов, мас.%								
	C	Mn	Si	Mo	V	Cr	Ni	P	S
1	0,82	0,74	0,94	0,21	0,08	0,05	0,04	0,02	0,03
2	0,82	0,61	0,95	0,44	0,09	0,06	0,07	0,02	0,03
3	0,81	0,63	1,09	0,70	0,10	0,04	0,06	0,02	0,03
4	0,83	0,65	1,11	1,01	0,09	0,04	0,06	0,02	0,03

В табл. 2 приведены результаты термического упрочнения образцов диаметром 140×130 мм после

закалки с нагревом при 900 °С (1,5 ч) и отпуска при 160, 250 и 550 °С.

Таблица 2. Твердость на торцевой поверхности заготовки диаметром 140×130 мм стали 78ГМФС с различным содержанием Мо после закалки с 900 °С в масло и отпуска при разных температурах

Номер плавки	Твердость на торцевой поверхности заготовки HRC,			
	после закалки	после закалки и отпуска		
		160 °С, 2,5 ч	250 °С, 2,5 ч	550 °С, 1,5 ч
1	46–47	45	44	37
2	61–61,5	58–59	55–56	42–42,5
3	62	59,5–60,5	59–60	48–48,5
4	62–63	60–60,5	59,5–60	48,5–49

Из таблицы видно, что увеличение содержания молибдена в стали 78ГМФС от 0,21 до 0,41% способствует значительному повышению закаливательной способности стали при охлаждении с температуры нагрева 900 °С в масло и обеспечивает реализацию мартенситного превращения на поверхности заготовки диаметром 140×130 мм (в первом случае здесь происходило перлитное превращение). А какое же содержание молибдена

в стали 78ГМФС следует признать оптимальным? Ведь легирование стали молибденом достаточно дорогое удовольствие. Результаты последующих исследований дали ответ на этот вопрос.

Исследовали прокаливаемость стали 78ГМФС (плавки 1–4) по сечению заготовок диаметрами 90×130 и 140×130 мм, разрезая их после термического упрочнения пополам по размеру 130 мм. Результаты исследований приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Твердость по сечению заготовки диаметром 90×130 мм после разреза пополам по размеру 130 мм. Упрочнение: закалка с 900 °С (1,5 ч) в масло + отпуск, 160 °С, 2,5 ч

Номер плавки	Твердость HRC ₃ по контрольному сечению заготовки диаметром 90 мм на расстоянии от края					
	край	5 мм	8–10 мм	20 мм	30 мм	середина
1	46	45	43	40	32	30
2	61,5–62,5	60,5	59	57	54	51
3	62	61	60	59,5	59,5	58
4	62,5	62	61,5	61	60,5	59

Таблица 4. Твердость по сечению заготовки диаметром 140×130 мм после разреза пополам по размеру 130 мм. Упрочнение: закалка с 900 °С (1,5 ч) в масло + отпуск, 250 °С, 2,5 ч

Номер плавки	Твердость HRC ₃ в контрольном сечении заготовки диаметром 140 мм на расстоянии от края					
	край	5 мм	10 мм	20 мм	40 мм	середина
1	Не проводились					
2	55,5–56,0	53	51	45	38	30
3	59	57,5–58,0	54–55	52	49,5	46
4	59,5	59	58	55	53	52

Определяли ударную вязкость сталей с различным содержанием молибдена после проведения упрочнения образцов размером 15×15×60 мм (табл. 5). Показано, что с увеличением присутствия мо-

либдена в составе стали от 0,21 до 1% наряду с повышением твердости (соответственно от HRC₃ 61–62 до HRC₃ 62,5–64,0) ударная вязкость сохранялась на высоком уровне: 0,28–0,34 МДж/м².

Таблица 5. Механические свойства сталей с различным содержанием молибдена после упрочнения образцов диаметром 15×15×60 мм: закалка с 900 °С в масло + отпуск, 180 °С, 3 ч

Номер плавки	Твердость HRC ₃	Ударная вязкость, МДж/м ²
1	61–62	0,28–0,32
2	61,5–62,5	0,30–0,32
3	62–63	0,30–0,34
4	62,5–64	0,30–0,34

В результате проведенных исследований отметили, что сталь 78ГМФС в зависимости от содержания в ее составе молибдена может быть использована по различному назначению:

- при содержании Мо 0,15–0,25% [13] – для замены углеродистых сталей типа У7А–У10А в рабочих частях технологической оснастки, а также в конструкциях машиностроения для замены легированных сталей на бесхромистую;
- при содержании Мо 0,4–0,5% [13] – для замены инструментальных сталей типа 9ХС, 8ХФ и т.п., а также для использования при создании новых инструментальных сталей в качестве основной матрицы с введением дополнительно хрома от 0,5 до 4,5% [1];
- при содержании Мо 0,6–0,9% – для использования в качестве среднелегированной инструментальной стали, аналоги которой отсутствуют;

- при содержании Мо 1,0–1,5 % – для замены высоколегированных инструментальных сталей;

- при содержании Мо 2–3% при одновременном снижении содержания углерода до 0,35–0,5% – на создание новых инструментальных сталей для рабочих частей формообразующей оснастки при ее разогреве до 500–600 °С.

Литература

1. Кукуй Д.М., Федулов В.Н. Разработка легирующей матрицы для создания белорусских инструментальных сталей на базе стали 70К (У7А) производства РУП “БМЗ” (обзор и исследование) //Литье и металлургия. 2004. №2 (30). С. 109–116.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г.Сорокин, А.В.Волосникова, С.А.Вяткин и др. М.: Машиностроение, 1989. С. 363–368.
3. Позняк Л.А., Скрыпченко Ю.М., Тишавев С.И. Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980.

4. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Metallurgy, 1979.
5. Голиков И.Н., Гольдштейн М.И., Мурзин И.И. Ванадий в стали. М.: Metallurgy, 1968.
6. Вязников Н.Ф. Легированная сталь. М.: Metallurgizdat, 1963.
7. Пиккеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. М.: Metallurgy, 1982.
8. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. М.: Metallurgy, 1971.
9. Бейн Э. Влияние легирующих элементов на свойства стали. М.: Metallurgizdat, 1945.
10. Гудремон Э. Специальные стали. В 4-х т. Т. 2. М.: Metallurgizdat, 1963.
11. Блантер М.Г. Фазовые превращения при термической обработке стали. М.: Metallurgizdat, 1962.
12. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. 5-е изд. М.: Metallurgy, 1984.
13. Пат. RU 2041968 С 1. Бюл. №24. 2000.