

© М.А. Филиппов, С.В. Буров, В.В. Легчило, А.М. Фивейский,  
С.В. Антонов, Е.Н. Мухаметярова, 2012 г.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
г. Екатеринбург

## **ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ СТАЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА**

С помощью дюрометрического, металлографического и рентгеноструктурного анализов изучена взаимосвязь износостойкости при абразивном изнашивании со способностью к упрочнению рабочей поверхности и работой разрушения при царапании ряда аустенитных марганцевых сталей системы 1,1 % С–Fe–Mn с переменной концентрацией марганца (3–13 %) и изменяющейся стабильностью аустенита. Показано, что стали с метастабильным аустенитом обеспечивают высокий уровень эффективной микротвердости, уровень работы разрушения при царапании и более высокую на 40–50 % износостойкость сталей по сравнению со стабильным аустенитом стали 110Г13. Величина эффективной микротвердости адекватно характеризует сопротивление абразивному изнашиванию метастабильных аустенитных сталей.

Классическая зависимость износостойкости технически чистых металлов, углеродистых и хромистых сталей от их исходной твердости М.М. Хрущова, позволяет адекватно прогнозировать относительную износостойкость большинства технически значимых материалов [1]. Однако для сталей аустенитного класса, способных к интенсивному деформационному упрочнению вследствие специфики механизма пластической деформации в ГЦК-решетке, особенно с низкой энергией дефектов упаковки, эта зависимость не выполняется: например, широко распространенная износостойкая сталь 110Г13Л со структурой стабильного аустенита и исходной твердостью 2300 МПа имеет примерно такую же износостойкость при испытании по закрепленному абразиву, как закаленная сталь 40 с твердостью около 7000 МПа. Это несоответствие низкой исходной твердости марганцевой аустенитной стали 110Г13Л с ее высокой износостойкостью объясняется интенсивным фрикционным упрочнением ее рабочей поверхности, приобретающей микротвердость приближающуюся к закаленной на мартенсит стали 40. Еще в большей степени это несоответствие присуще сталям со структурой метастабильного аустенита.

Использование критерия М.М. Хрущова для предварительной оценки абразивной износостойкости применительно к сталям со

структурой метастабильного аустенита, превращающегося в дисперсный мартенсит в процессе изнашивания, имеет ту особенность, что оценивать необходимо не исходную перед испытанием твердость, а измерять конечную, или так называемую эффективную микротвердость, величина которой после изнашивания на рабочей поверхности более адекватно характеризует сопротивление абразивному изнашиванию этих сталей [2]. Величина эффективной микротвердости складывается из суммы исходного значения микротвердости ( $H_0$ ) и его прироста ( $\Delta H$ ) на поверхности изнашивания:  $H_{эф} = H_0 + \Delta H$ . Эффективная микротвердость в отличие от отдельных значений механических свойств служит комплексной характеристикой прочности поверхностного слоя материала, учитывающей наряду с исходной твердостью также и упрочнение, вносимое фазовыми превращениями в процессе изнашивания и деформационным упрочнением присутствующих и вновь образующихся фаз, в частности упрочнение от образования мартенсита деформации.

Представляет интерес изучить возможность оценки абразивной износостойкости сталей аустенитного класса переменного состава с помощью метода конечной микротвердости в сопоставлении с альтернативным методом, в качестве которого выбрана методика изучения работы сопротивления срезу при царапании металла алмазным индентером [3].

Материалом исследования служили стали системы Fe–Mn–C: 110Г13; 110Г8; 110Г6; 110Г3Х3, химический состав которых указан в табл. 1. Слитки выплавлялись в индукционной печи емкостью 60 кг и были прокованы в прутки сечением 12 x 12 мм. Из закаленных в воде от 1100 °С заготовок изготавливались образцы размером 10x10x25 мм.

Таблица 1

Химический состав сталей

Сталь / химический элемент (% по массе)	C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %
110Г6	1,12	5,96	0,57	0,048	0,018
110Г8	1,05	7,90	0,60	0,042	0,015
110Г13	1,10	13,00	0,65	0,050	0,01
110Г3Х3	1,03	2,99	0,55	0,053	0,022

Изучение абразивной износостойкости проводили на установке, смонтированной на базе строгального станка. Образцы с площадью рабочей части 10 x 10 мм совершали возвратно-поступательное движение по шлифовальной бумаге 14А32МН481 (ГОСТ 6456-82) на корундовой основе. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/сек. составлял 78 м. Нормальная нагрузка, действующая на

образец, 10 Н (удельная нагрузка 1 МПа). Величина поперечного смещения шлифовальной бумаги за один двойной ход образца равнялась 1,2 мм. Абразивная износостойкость определялась по результатам двух параллельных испытаний (эталон – сталь 110Г13Л), сравнение результатов производили через относительные единицы:

$$K_{\text{изн}} = M_z/M_o,$$

где  $K_{\text{изн}}$  – коэффициент относительной износостойкости,

$M_z$  – потеря массы стали 110Г13,

$M_o$  – потеря массы испытуемого образца.

Основу установки для измерения работы разрушения при царапании составляет модернизированный прибор для измерения микротвердости ПМТ-3, в котором индентер закреплен на свободном конце тензометрической балки. В качестве индентера применялась четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$  по ГОСТ 9450-76 от прибора ПМТ-3. Оптическая система прибора используется для ориентации рабочего органа прибора по месту и направлению трассы царапания в исследуемой области микрошлифа. Исследуемый образец жестко закрепляется на рабочем столике прибора, снабженном электромеханическим приводом перемещения и тензометрическим датчиком этого перемещения. Установка позволяет автоматически регистрировать нормальную составляющую усилия вдавливания алмазной пирамиды и изменение усилия при разгрузке, а также усилие царапания при перемещении образца под вдавленной алмазной пирамидой. Кроме того, фиксировалась глубина внедрения индентера. В данном случае, характер взаимодействия индентера и образца наиболее точно соответствует условиям абразивного изнашивания. Критерием оценки износостойкости представляют напряжение царапания, равное отношению тангенциальной составляющей усилия при склерометрировании к площади сечения царапины. Сигналы тензодатчиков усилия царапания и величины перемещения, усиленные двухканальным тензоусилителем, регистрируются самопишущим двухкоординатным миллиамперметром. Таким образом, получаем диаграмму горизонтальной составляющей усилия царапания по длине царапины, по которой возможно определить усилие царапания в любой точке трассы. Расчетное выражение для определения удельной энергии разрушения получено как отношение усилия царапания в определённой точке трассы к площади удалённого металла в данной точке

$$\Delta U = 4T/B^2 \times \text{tg } 22,$$

где  $U$  – удельная работа разрушения, кДж/м<sup>2</sup>;

$B$  – ширина царапины, см;

$T$  – горизонтальная составляющая силы, Н.

Рентгеноструктурный анализ фазового состава проведен на аппарате ДРОН-2.0 в  $\text{Co-K}_\alpha$ -излучении\*. Расчет температуры  $M_n$  исследуемых сталей выполнен по формуле А.А. Попова [4].

Результаты испытаний образцов после абразивного изнашивания приведены в табл. 2. Видно, что абразивная износостойкость сталей с 1,1 % С закономерно возрастает по мере уменьшения концентрации марганца от 13 до 3 %. С уменьшением концентрации марганца так же монотонно увеличиваются такие параметры, как микротвердость на поверхности изнашивания и удельная работа разрушения при царапании. Помимо этого в табл. 2 приведены результаты расчета коэффициента упрочнения ( $H_{\text{пов}}/H_{\text{исх}}$ ), исходной микротвердости, точки начала мартенситного превращения и количества мартенсита на поверхности после абразивного износа.

Таблица 2

Результаты испытаний при абразивном изнашивании ( $K_{\text{изн}}$ ), микротвердость поверхности до ( $H_{\text{исх}}$ ) и после ( $H_{\text{пов}}$ ) испытания, удельная работа разрушения при царапании ( $W$ ) и количество мартенсита на поверхности ( $\Sigma M$ ) исследуемых сталей

Марка стали	$K_{\text{изн}}$	$H_{\text{пов}}, \text{кг/мм}^2$	$H_{\text{исх}}, \text{кг/мм}^2$	$H_{\text{пов}}/H_{\text{исх}}$	$W, \text{кДж/см}^3$	$M_n(\text{расч}), ^\circ\text{C}$	$\Sigma M, \%$
110Г13	1,00	550	230	2,26	8,36	-269	0
110Г8	1,39	617	224	2,93	9,04	-195	35
110Г6	1,41	657	201	3,07	9,54	-124	40
110Г3Х3	1,57	845	297	2,85	10,56	-13	35

Изменение коэффициента износостойкости при абразивном износе показано на рис. 1. Видно, что с увеличением марганца в сталях с 1,1 % С коэффициент убывает, что объясняется увеличением стабильности аустенита и соответственно уменьшением вклада образования мартенсита деформации в упрочнение поверхности при абразивном изнашивании.

\* Выполнено Л.Д. Чумаковой

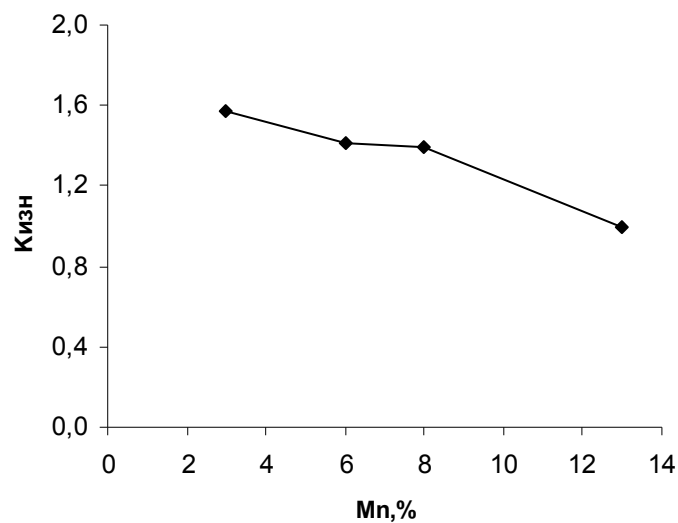


Рис. 1. Изменение коэффициента относительной износостойкости при абразивном износе от количества марганца в сталях с 1,1 % С

Изменение коэффициента упрочнения показано на рис. 2. В метастабильных сталях с 3–8 % Mn коэффициент выше, чем у стали Гадфильда, однако у стали 110Г3Х3 он несколько ниже, чем у сталей 110Г6 и 110Г8 за счет более высокой исходной микротвердости поверхности.

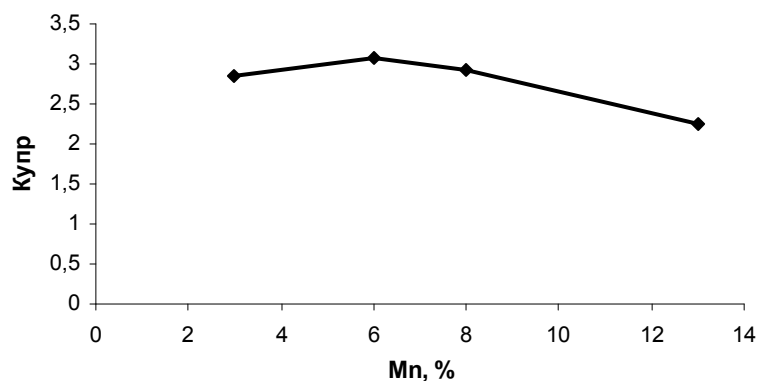


Рис. 2. Изменение коэффициента упрочнения поверхности при абразивном изнашивании от количества марганца в сталях с 1,1 % С

Эффективная микротвердость исследуемых сталей после абразивного износа представлена на рис. 3.

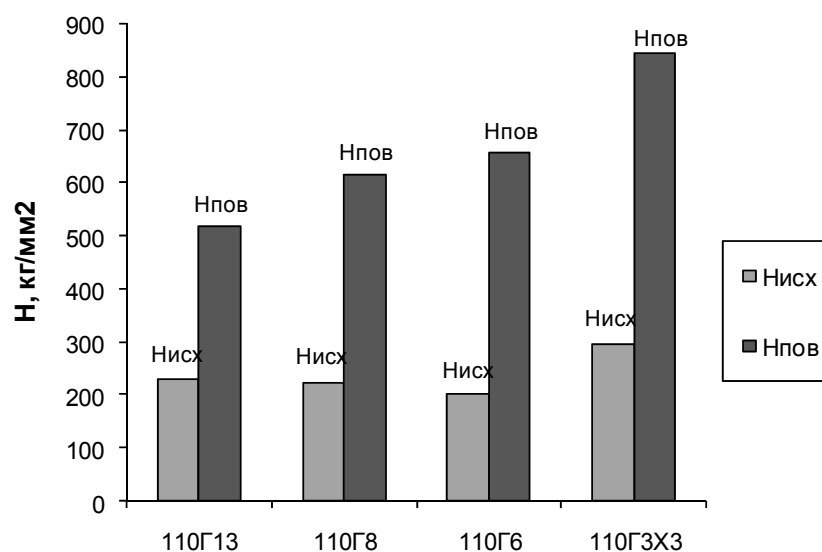


Рис. 3. Эффективная микротвердость при абразивном изнашивании в сталях системы Fe-Mn-1,1 % C

Стабильность аустенита возрастает по мере увеличения содержания как марганца, так и хрома [4], однако в данной работе закономерного уменьшения количества мартенсита деформации на рабочей поверхности образцов МАС 110Г6, 110Г8 и 110Г3Х3 после испытания на изнашивание по закрепленному абразиву не обнаружено (табл. 2), то есть тесной взаимосвязи между количеством «мартенсита трения» и степенью упрочнения поверхности для исследуемых сталей не наблюдается. Количество мартенсита на поверхности образцов МАС 110Г6, 110Г8 и 110Г3Х3 составляет 35–40 % и находится в пределах ошибки определения фазового состава методом рентгеноструктурного анализа. Возможно, поскольку глубина слоя, с которого получены интерферограммы при рентгеноструктурном анализе в  $\text{Co-K}_\alpha$ -излучении, составляет до 9 мкм, непосредственно на поверхности разрушения имеет место различная интенсивность образования мартенсита в этих сталях.

Дисперсные кристаллы мартенсита деформации в сталях 110Г3Х3, 110Г6, 110Г8, размеры которых ограничены шириной следа царапины после абразивного изнашивания, образуются под определенными углами в виде параллельных рядов (рис. 4). В стали 110Г13 образование мартенсита деформации металлографически не обнаружено. Известно, что кристаллы мартенсита деформации образуются при прохождении частиц абразива в зоне растяжения в соответствии с известными ориентационными соотношениями решеток аустенита и мартенсита.

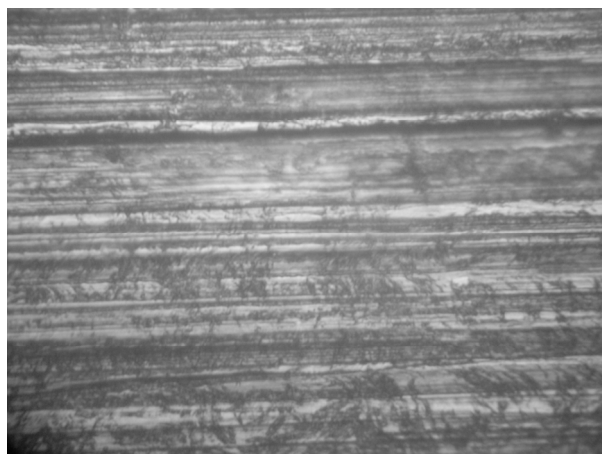


Рис. 4. Микроструктура стали 110Г8 на поверхности после абразивного изнашивания:  $\times 800$

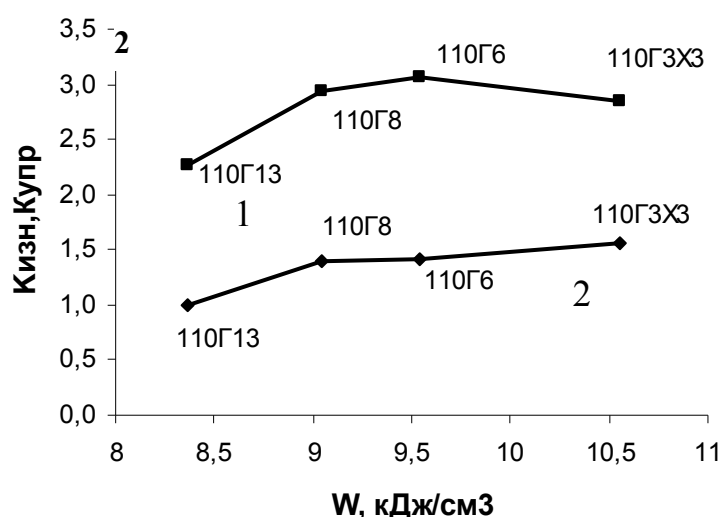


Рис. 5. Изменение коэффициента износостойкости и коэффициента упрочнения в зависимости от удельной работы разрушения при царапании исследуемых сталей: 1 –  $K_{изн}$ ; 2 –  $K_{упр}$

Механизм разрушения поверхности при абразивном изнашивании моделируется испытаниями на удельную работу разрушения при единичном акте царапания. Величина удельной работы разрушения увеличивается по мере уменьшения стабильности аустенита исследуемых сталей от стали 110Г13 к стали 110Г3Х3 аналогично величине эффективной микротвердости рабочей поверхности (табл. 2). Даная зависимость объясняется тем, что образование мартенсита деформации в процессе царапания увеличивает прочность металла при оттеснении и

срезе, поэтому удельная работа разрушения увеличивается с уменьшением марганца в стали.

Из сравнения графиков зависимости коэффициента износостойкости и коэффициента упрочнения от удельной работы разрушения при царапании (рис. 5), обе эти величины закономерно уменьшаются в зависимости от удельной работы разрушения, то есть абразивная износостойкость однозначно связана с этой характеристикой так же, как удельная работа разрушения сталей при царапании. С другой стороны, абразивную износостойкость можно прогнозировать с помощью более просто определяемой характеристики эффективной микротвердости рабочей поверхности.

С позиций структурно-энергетической теории износостойкости металлических сплавов при контактом нагружении рассеяние подводимой к рабочей поверхности энергии при внешнем воздействии наиболее эффективно производится структурой с метастабильным аустенитом, превращающимся в дисперсный мартенсит в процессе эксплуатации. Самоорганизация структуры, обусловленная релаксационными процессами при образовании мартенсита трения, в сочетании с высоким уровнем деформационного упрочнения поверхностного слоя и формирование сжимающих напряжений обеспечивают высокую стойкость при контактом воздействии на поверхность. Метастабильные аустенитные стали рассматриваются в качестве эффективного материала, удовлетворяющего принципам синергетического подхода к диссипативным системам [5–8].

### **Выводы**

1. Проведено сравнительное изучение абразивной износостойкости при испытании по закрепленному абразиву закаленных от 1100 °С в воду сталей с 1,1 % углерода и переменной концентрацией марганца – 3, 6, 8 и 13 % во взаимосвязи с деформационными мартенситными превращениями, работой разрушения при царапании и способностью к упрочнению под действием абразивных частиц.

2. Использование критерия М.М. Хрущева для предварительной оценки абразивной износостойкости применительно к сталям системы Fe-Mn-C со структурой метастабильного аустенита, превращающегося в мартенсит в процессе изнашивания, имеет ту особенность, что оценивать необходимо не исходную перед испытанием твердость, а так называемую эффективную микротвердость, величина которой после измерения на рабочей поверхности адекватно характеризует сопротивление абразивному изнашиванию метастабильных аустенитных сталей.

3. Образование до 40 % дисперсных кристаллов  $\alpha$ -мартенсита деформации на поверхности образцов исследуемых сталей 110Г3Х3, 110Г6 и 110Г8 с метастабильным аустенитом обуславливает высокий уровень



эффективной микротвердости, повышенный уровень работы разрушения при царапании и более высокую на 40–50 % износостойкость сталей по сравнению со стабильным аустенитом стали 110Г13.

#### **Список использованных источников**

1. *Хрущов М.М., Бабичев М.А.* Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
2. *Коршунов Л.Г.* Изнашивание металлов при трении // *Металловедение и термическая обработка стали* / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1991. Т. 1, кн. 2. С. 387–413.
3. *Королев Н.В., Фивейский А.М.* Метод оценки удельной энергии разрушения наплавочных сплавов. Материалы докладов 19-й науч.-техн. конф. сварщиков Урала. Челябинск: ЦНТИ, 2000. С. 166–168.
4. *Филиппов М.А.* Метастабильный марганцевый аустенит как структурная основа сталей с высокой стойкостью в условиях динамического контактного нагружения // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 10. С. 10–15.
5. *Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р.* Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988. 257 с.
6. *Богачёв И.Н., Минц Р.И.* Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин. М.: Машиностроение, 1964. 144 с.
7. *Попов В.С., Брыков Н.Н., Дмитриченко Н.С.* Износостойкость прессформ огнеупорного производства. М.: Металлургия, 1971. 160 с.
8. *Погодаев Л.И., Цветков Ю.Н.* [и др.] Структурно-энергетический критерий износостойкости металлов и сплавов с учетом жесткости напряженного состояния поверхности // *Проблемы машиноведения и надёжности материалов*. 1997. № 6. С. 40–52.