

Г. Н. Соколов



И. В. Зорин

УДК 621.793.620.172

**Г. Н. Соколов, д-р техн. наук, А. А. Артемьев, канд. техн. наук,
И. В. Зорин, канд. техн. наук, В. И. Лысак, д-р техн. наук,
В. Б. Литвиненко-Арьков, асп.**

Волгоградский государственный технический университет

zorin.iv@gmail.com

ДИАГНОСТИКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА МЕТОДОМ СКЛЕРОМЕТРИИ¹

Обоснована эффективность использования методики склерометрических испытаний наплавленного металла для оценки его технологических и эксплуатационных свойств при нормальной и повышенной (до 1000 °C) температуре. Выявлена взаимосвязь между структурой наплавленного металла и условиями формирования трека от индентора, а также обоснованы и уточнены критерии износстойкости.

Ключевые слова: склерометрия, износстойкость, диагностика наплавленного металла, композиционная структура, деформирование металла, атомно-силовая микроскопия, абразивное изнашивание, термосиловое воздействие.

Введение. Диагностика износстойкости наплавленных специальными сплавами деталей машин, оборудования и инструмента в машиностроении, теплоэнергетике, металлургии и других отраслях промышленности представляет актуальную задачу, напрямую связанную с экономией ресурсов.

Изнашивание наплавленного металла при 18—20 °C и высоких значениях температуры в условиях воздействия агрессивных сред, абразивных частиц и других контролей можно рассматривать как сложный процесс его разрушения. Типы, механизмы и кинетика разрушения износстойких сплавов различных систем легирования существенно отличаются. Для низкоуглеродистых низколегированных наплавленных сталей с гомогенной структурой характерны хорошо изученные вязкий и усталостный типы разрушения. Вследствие увеличения количества дислокаций в процессе изнашивания поверхностные объемы таких сплавов упрочняются и их разрушение происходит при минимальной способности к пластической деформации. Оценка износстойкости наплавленного металла в этом случае не вызывает проблем и производится с использованием известных методов [1, 2].

В гетерогенных системах современных композиционных износстойких сплавов, имеющих взаимную ориентировку пластичной матрицы и дисперсных упрочняющих фаз, скорость процессов и механизмы деструкции металла зависят от многих факторов. Прежде всего, от химического состава и структуры матрицы, а также от типа, размера, морфологии и распределения твердых структурных составляющих, разрушение которых может быть хрупким, вязким или усталостным [3, 4]. При этом показатель износстойкости и другие свойства наплавленного металла будут аддитивно или неаддитивно формироваться

из характеристик всех фаз, что усложняет количественную оценку износстойкости материала.

Особенно проблематична диагностика свойств композиционных сплавов, предназначенных для работы в условиях циклического термосилового воздействия. В этом случае под влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, а также термических ударов в тонком поверхностном слое металла постепенно формируется диффузионная зона, в которой протекают процессы разупрочнения и деструкции [5]. Прогнозировать износстойкость таких материалов можно по результатам дюрометрических исследований с комплексной оценкой упругопластических свойств металла, анализируя в процессе испытаний совместное изменение нагрузки на индентор и глубины отпечатка от него. Сопоставляя полученные значения твердости и запаса пластичности или твердости и деформируемости сплава, выявляют его способность претерпевать пластическую деформацию без разрушения в определенном временном диапазоне [6].

Однако более полную информацию о свойствах материалов специального назначения удается получить по результатам склерометрических испытаний, имитирующих воздействие абразивной частицы на поверхность трения. Так определяют твердость по Мейеру [7], коррелирующую с истинным сопротивлением металла разрыву при растяжении [8, 9], и другие механические характеристики [10, 11] сплавов. На основе теоретического моделирования процесса скрайбирования и практических испытаний изучают механизм [12] и рассчитывают энергоемкость процесса разрушения металла [13], исследуют влияние содержания легирующих элементов на стойкость против абразивного изнашивания [14]. Кроме того, можно рассчитать топографию поля напряжений в зоне трека от индентора [15], выявить структурно-фазовые превращения, протекающие в деформированных при испытании микрообъемах наплавленного металла, и установить взаимосвязь его структуры с износстойкостью [16]. Вместе с тем, исходя из анализа литературы пока еще не уста-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта Минобрнауки № 16.740.11.0017.



-БЕ ФИЛЬМЫШАНЫ БН ВЛОСТАМ ОЛОННЕКСЫЛАН ЕММЕТПОЛН

Номер эксперимента	Наплавленный металл	Структура наплавленного металла	Твердость при 18—20 °C, HRC
1	260Х24Н67М4Б2	Твердый раствор γ -Ni, карбиды, карбидная эвтектика, интерметаллиды	36
2	20Х7Г12Н2 + 8 % TiB ₂	Аустенит, включения TiB ₂ , карбоборидная эвтектика	20
3	20Х7Г12Н2 + 18 % TiB ₂	Карбоборидная эвтектика, включения TiB ₂	46
4	20Х7Г12Н2 + 28 % TiB ₂	Карбоборидная эвтектика, включения TiB ₂ , бориды, карбобориды	60
5	(100...300)Х10Н4 + 25 % TiB ₂	Карбоборидная эвтектика, включения TiB ₂ , карбиды, бориды, карбобориды	50—55
6	35Х3В9ФСГ	Легированный мартенсит, продукты распада мартенсита, остаточный аустенит, карбиды	50
7	220Х26М6Н2	Твердый раствор α -Fe, карбиды, карбидная эвтектика	40
8	80Х4Н74Ю10М3В3Ц2	Матрица на основе интерметаллида Ni ₃ Al, карбиды, интерметаллиды	42

новлен обобщающий показатель для достоверной оценки износостойкости наплавленного металла. Качественным показателем сопротивления сплавов изнашиванию мог бы служить относительный объем металла, удаленного из трека индентором в процессе скрайбирования полированной и травленой поверхности металлического образца [17], однако необходимо с использованием современных методов атомно-силовой и электронной микроскопии экспериментально обосновать возможность практического применения такой методики.

Цель работы — исследование процесса склерометрирования наплавленного металла различных структурных классов и уточнение критерия износостойкости.

Методы исследования, оборудование и материалы.

Испытания наплавленного металла различных систем легирования проводили с использованием разработанного в ВолгГТУ склерометра (рис. 1, а)². Скрайбирование поверхности экспериментальных образцов выполняли в аргоне при нормальной и повышенных до 1100 °C температурах алмазными инденторами Роквелла (конус с углом при вершине 120° и радиусом заточки 200 мкм) и Виккерса (четырехгранная пирамида с квадратным основанием и углом между противоположными гранями 136°, ребрами 148°) при движении пирамиды ребром вперед. Использование таких инденторов при нагрузке 0,5—1,0 Н и скорости их перемещения 1—5 мм/с способствовало формированию треков в режиме пластической деформации металла без эффекта резания.

Экспериментальные образцы (рис. 1, б) из стали 20 наплавляли термо- и износостойкими сплавами (см. таблицу) с использованием присадочных порошковых проволок в дуговом (с неплавящимся электродом в гелии в один проход) (поз. 2, 7) и электрошлаковом (поз. 1, 3—6) процессах. После механической обработки, полирования и травления образцы закрепляли в токоподводящем устройстве склерометра, затем его камеру продували аргоном и герметизировали. При достижении заданной температуры испытаний выполняли склерометрирование на центральном участке наплавленного образца. Длина контрольного участка трека составляла 10 мм.

Топографию поверхности микрошлифов и треков на них получали в режиме полуkontakteчной атомно-силовой микроскопии (АСМ) с применением сканирующего зондового мик-

скопа Solver Pro, оснащенного программным комплексом Nova и модулем обработки изображений Image Analysis (рис. 2). Диапазон сканирования по осям XY применяемого сканера составлял 100 × 100 мкм. В качестве зондов использовали кремниевые кантилеверы NSG01 с типичным радиусом заточки острия 10 нм. Твердость наплавленного металла измеряли твердомером TH-500.

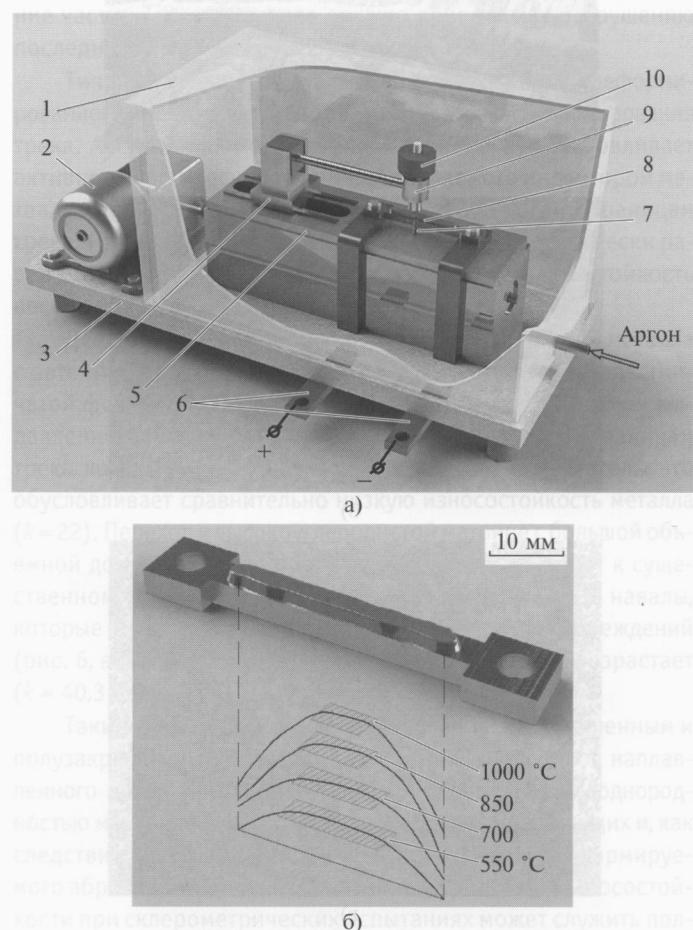


Рис. 1. Склерометр (а) и образец для склерометрических испытаний (б), наплавленный износостойким сплавом:
1 — герметичная камера; 2 — мотор-редуктор; 3 — основание;
4 — подвижная карета; 5 — направляющая; 6 — токоподводящие шины; 7 — термопара; 8 — испытуемый образец; 9 — держатель с индентором; 10 — сменные грузы

² Патент 2281475, 87018 (РФ).

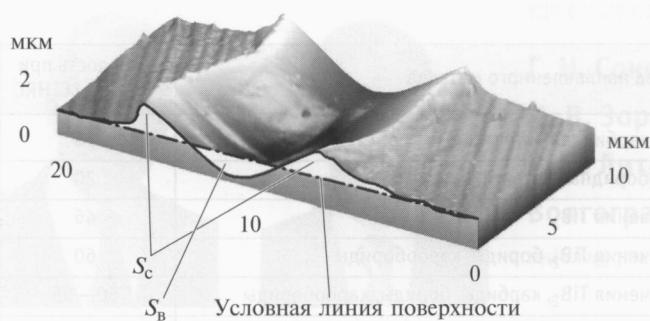
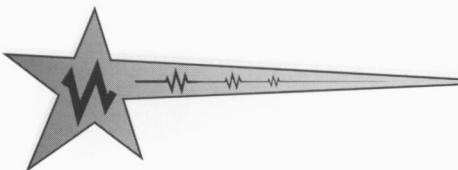


Рис. 2. Вид трека от индентора (3D-изображение) со схемой измерения площадей деформированного металла (S_B — площадь сечения выдавленного индентором металла; S_c — площадь сечения смещенного в бугры деформации металла)

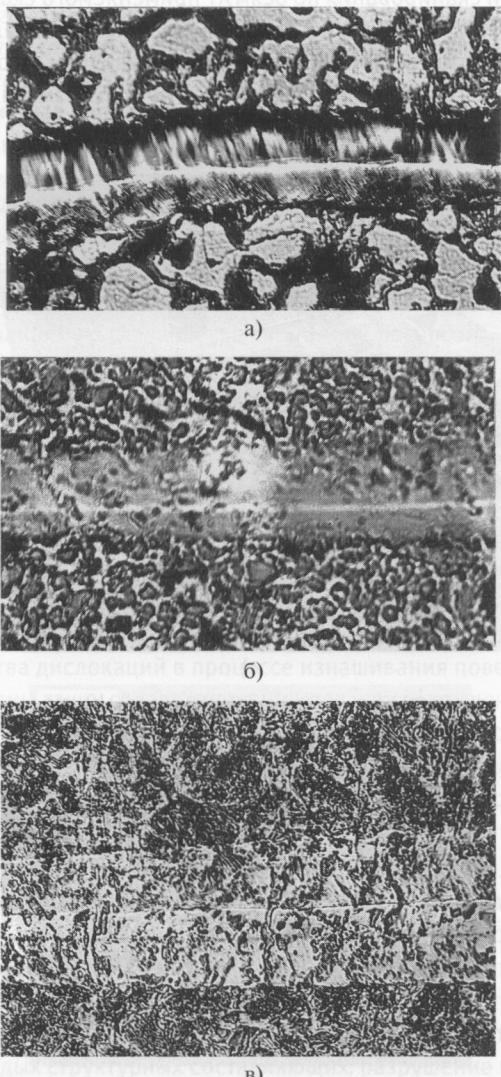


Рис. 3. Микроструктура наплавленного металла в зоне трека от индентора ($\times 400$): а — однократное деформирование сплава 2 (см. таблицу, поз. 2) ребром алмазного индентора в виде четырехгранной пирамиды; б, в — однократное и многократное деформирование наплавленного металла (см. таблицу, поз. 3) алмазным конусным индентором

Испытания наплавленного металла на изнашивание закрепленным абразивом проводили на экспериментальной установке — аналоге машины X4-Б. Относительную износостойкость оценивали по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta G_3}{\Delta G_i}, \quad (1)$$

где ΔG_3 , ΔG_i — потеря массы эталона (сталь 45 в отожженном состоянии) и испытываемого образца соответственно.

Структуру, микроморфологию и элементный состав наплавленного металла изучали с применением оптической (микроскоп Axiovert 40 MAT) и электронной (растровый электронный микроскоп Quanta 3D FEG) микроскопии. Содержание легирующих элементов в структурных составляющих определяли при сканировании шлифов в локальном объеме металла до $0,5 \text{ мкм}^3$ в режиме использования сигналов электронов обратного рассеяния и вторичных электронов (энергодисперсионный анализатор EDAX).

Результаты эксперимента и их обсуждение. В процессе исследований установлено, что структурные изменения в зоне упругопластически деформированного при $18—20^\circ\text{C}$ наплавленного металла типа 260Х24Н67М4Б2 наиболее ярко проявляются при полидеформационном (многократном — до 20 раз) воздействии на контролируемый образец конусом Роквелла (рис. 3). Трансформация структуры такого сплава заключается в распаде легированного твердого раствора на основе никеля и выделении дисперсных вторичных карбидов. Диагностируя поведение такого материала в условиях абразивного изнашивания, можно предположить, что в результате увеличения доли упрочняющих фаз в структуре износостойкость его временно повысится, а затем вследствие возрастания плотности дислокаций и напряженного состояния в тонком поверхностном слое могут зародиться и раскрыться микротрешины, что приведет к интенсификации процесса изнашивания. Этот метод диагностики, хотя и максимально моделирует воздействие контроллеров на изтираемую поверхность, но не обеспечивает получение количественных данных, характеризующих износостойкость материалов.

Критерием износостойкости при постоянной нормальной нагрузке на индентор может служить показатель, обратно пропорциональный полному объему V_d деформированного индентором металла:

$$k = \frac{10^{-3}}{V_d} = \frac{10^{-3}}{V_b + V_c}, \quad (2)$$

где V_b — объем выдавленного металла, равный $S_b^{cp} L = \sum_{i=1}^n S_b^i L$; (S_b^{cp}) — средняя площадь сечения выдавленного металла в n сечениях, перпендикулярных направлению трека (см. рис. 2, б); S_b^i — площадь i -го сечения деформированного металла, ограниченная профилем впадины трека и условной линией поверхности образца; L — контрольная длина трека); V_c — объем металла, смешенного в бугры деформации по границам трека,

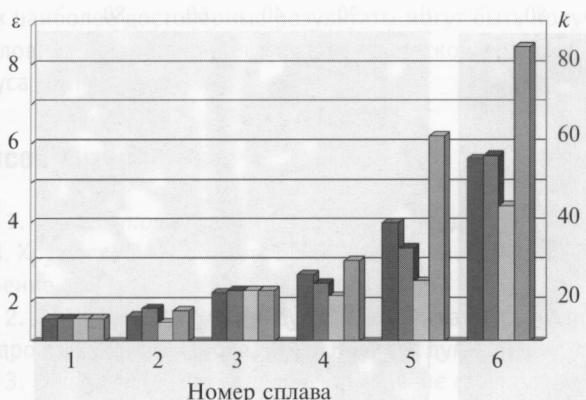


Рис. 4. Диаграмма коэффициентов относительной износостойкости ε (■) и показателей износостойкости k_d (■), k_b (■), k_c (■), вычисленных с учетом объемов деформированного V_d , выдавленного V_b и смешенного в бугры V_c металла соответственно:

1—3 — сплавы с матрицей 20X7Г12Н2 и содержанием TiB₂ 8, 18 и 28 % соответственно; 4—6 — сплавы с матрицей X10Н4 и содержанием графита 1, 2 и 3 % соответственно (для упрощения анализа все значения k приведены к показателям сплава 1)

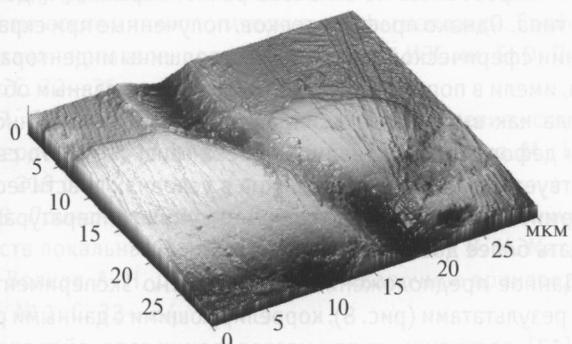


Рис. 5. Топография скрайбированной поверхности композиционного наплавленного металла, упрочненного частицами TiB₂

равный $S_c^{cp} L = \frac{i=1}{n} L (S_c^{cp})$ — средняя площадь сечения смешенного металла в n сечениях, перпендикулярных направлению трека; S_c^i — площадь i -го сечения смешенного металла, ограниченная профилем наплыдов по обеим границам трека и условной линией поверхности образца); 10^{-3} — эталонный объем металла, введенный для получения безразмерности показателя k .

Для проверки адекватности данной методики определяли корреляционную связь между значениями показателя износостойкости k и коэффициента относительной износостойкости ε при трении образцов, вырезанных из наплавленного металла различных структурных классов (рис. 4).

Коэффициент корреляции Пирсона равен 0,9977 и установлен с вероятностью безошибочного прогноза $p > 99\%$ при числе степеней свободы $n = 4$, т. е. его значение можно считать достоверным. Таким образом, можно утверждать наличие корреляционной связи между объемом металла, деформирован-

ным при однократном акте скрайбирования индентором, и потерей массы образца при многократных проходах абразивных частиц. При этом по вычисленному уравнению регрессии

$$\varepsilon = 0,15 + 0,114k \quad (3)$$

можно на основании рассчитанного показателя k с определенной точностью определить коэффициент ε .

Исследование треков на поверхности наплавленного металла с помощью атомно-силовой микроскопии позволяет с учетом высокого пространственного разрешения точно вычислить объем деформированного металла, а также оценить характер микропластической деформации различных структурных составляющих наплавленного металла.

Показано (рис. 5), что при движении алмазный индентор типа Виккерса глубоко деформирует матрицу композиционного наплавленного металла (см. таблицу, поз. 5), армированного частицами диборида титана TiB₂, однако при столкновении с высокотвердой частицей вследствие резкого возрастания напряжений он выходит на поверхность, деформируя существенно меньший объем материала. На поверхности упрочняющей частицы отсутствуют следы растрескивания и выкрошивания, что свидетельствует о прочности самой частицы и ее надежном закреплении в матрице сплава. В реальных условиях столкновение частиц TiB₂ и абразива должно приводить к разрушению последнего вследствие его меньшей твердости.

Тип наплавленного металла влияет как на объем деформированного индентором металла, так и на характер формирования трека. Аустенитная матрица сплава (рис. 6, а) обуславливает активное пластическое течение вытесняемого индентором металла и формирование гладких и широких бугров по границам трека. При этом объем выдавленного металла практически равен объему металла, смешенного в бугры, а износостойкость весьма низкая ($k = 9,7$).

Деформация твердого и хрупкого наплавленного металла с эвтектической матрицей и упрочняющими фазами пластинчатой формы (рис. 6, б) характеризуется малым объемом выдавленного металла, узкими и высокими буграми по границам трека, которые имеют значительные повреждения и сколы, что обуславливает сравнительно низкую износостойкость металла ($k = 22$). Переход к высокоуглеродистой матрице с большой объемной долей карбоборидной твердой фазы приводит к существенному снижению объема металла, смешенного в навалы, которые имеют гладкую поверхность без видимых повреждений (рис. 6, в). Износостойкость при этом значительно возрастает ($k = 40,3$).

Таким образом, в условиях изнашивания закрепленным и полузакрепленным абразивом композиционных типов наплавленного металла, характеризующихся значительной неоднородностью механических свойств структурных составляющих и, как следствие, изменением по длине трека, объема деформированного абразивом металла, достоверным критерием износостойкости при склерометрических испытаниях может служить полный объем V_d деформированного индентором металла при условии анализа большого (не менее пяти) числа сечений трека.

Анализ профилограмм поперечных сечений треков, полученных при высокотемпературных испытаниях с использованием индентора Виккерса, выявил превалирование величины V_b в полном объеме деформированного металла (рис. 7, а), что,

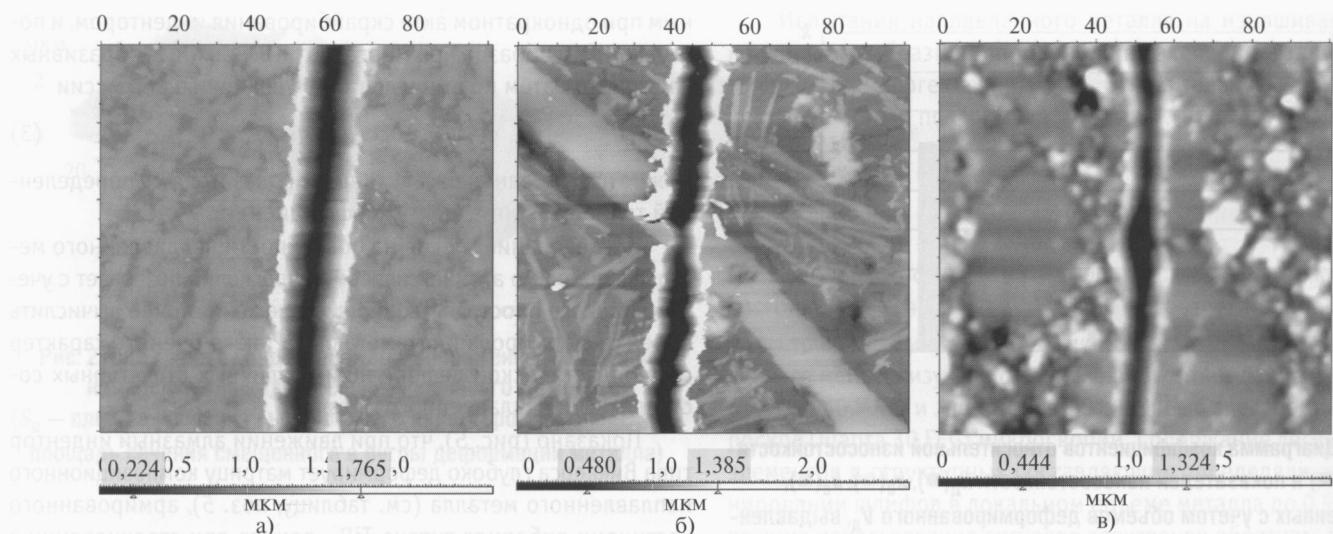
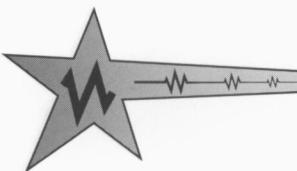


Рис. 6. Топографии скрайбированных поверхностей металла, наплавленного порошковыми проволоками 20Х7Г12Н2, содержащими 8 (а) и 28 (б) % TiB₂, и 200Х10Н4, содержащий 25 % TiB₂ (в)

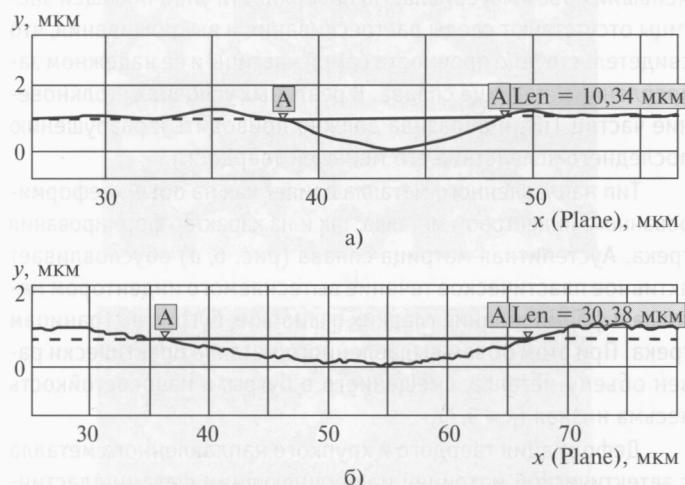


Рис. 7. Типовые профилограммы в поперечном сечении треков, полученных при использовании инденторов Виккерса (а) ($\times 3350$) и Роквелла (б) ($\times 1850$)

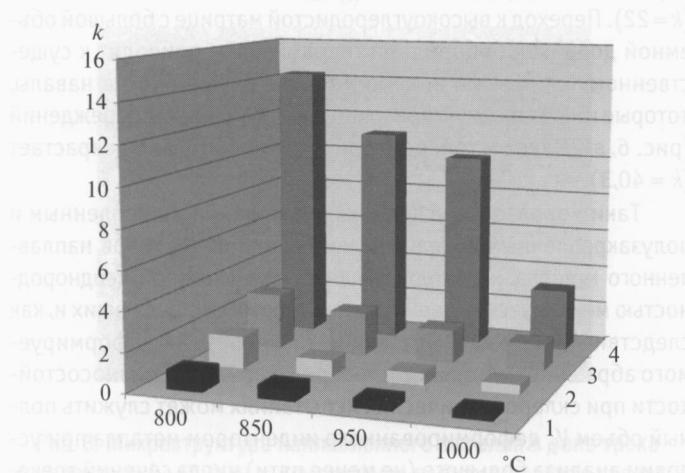


Рис. 8. Зависимость показателя износостойкости наплавленного металла k от температуры испытания: 1—4 — сплавы 35Х3В9ФСГ, 220Х26М6Н2, 260Х24Н67М4Б2, 80Х4Н74Ю10М3В3Ц2 соответственно

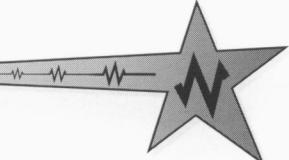
очевидно, обусловлено большей глубиной проникновения и срезом микрообъемов металла заостренной вершиной индентора этого типа. Однако профили треков, полученные при скрайбировании сферической поверхностью вершины индентора Роквелла, имели в поперечном сечении близкие к равным объемы металла как вытесненного индентором, так и смещенного в бугры деформации по границам трека (рис. 7, б). Это свидетельствует о формировании треков в условиях пластического деформирования металла, что при высоких температурах может дать более достоверный результат.

Данное предположение подтверждено экспериментальными результатами (рис. 8), коррелирующими с данными работами [17], полученными при исследовании горячей твердости наплавленного металла такого типа по Бриннелю.

Наибольшим значением показателя износостойкости k обладают сплавы на основе никеля и алюминида никеля Ni_3Al (см. таблицу, поз. 1 и 8), что свидетельствует о хорошей термостабильности и высоком сопротивлении термосиловому воздействию их композиционной структуры. Гетерогенная структура сплава 80Х4Н74Ю10М3В3Ц2 (см. таблицу, поз. 8) состоит из пластичной матрицы на основе γ - Ni_3Al , γ -фазы и карбидов, равномерно распределенных в ней, что обуславливает превосходное сопротивление наплавленного металла деформированию при высоких температурах. Показатель k сплавов на основе железа (см. таблицу, поз. 6 и 7) значительно ниже, что объясняется меньшей жаропрочностью их матрицы на основе α -железа. Комплексно упрочненный интерметаллидами и карбидами твердый раствор на основе γ - Ni (см. таблицу, поз. 1) имеет в сравнении с ними почти двукратное превосходство.

Выходы

1. В условиях изнашивания наплавленного металла закрепленным абразивом наиболее достоверной следует считать методику склерометрических испытаний с использованием индентора Виккерса, в соответствии с которой учитывается весь объем деформированного индентором металла (как выдавленный из трека, так и смещенный в бугры по его сторонам).



2. При высокотемпературных склерометрических испытаниях наиболее достоверные результаты могут быть получены в условиях формирования трека сферической поверхностью конуса Роквелла.

Список литературы

1. Износостойкость и структура твердых наплавок / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович и др. М.: Машиностроение, 1971. 96 с.
2. Лейначук Е. И. Электродуговая наплавка при абразивном и гидроабразивном износе. Киев: Наукова думка. 1985. 160 с.
3. Соколов Г. Н., Филюшин А. А. Влияние структуры и типа наплавленного металла на износостойкость кулачков трубообточных станков // Автоматическая сварка. 1988. № 8. С. 47—49.
4. Соколов Г. Н. Новые термостойкие композиционные материалы для наплавки на прессовый инструмент // Вопросы материаловедения. 2004. № 4. С. 51—59.
5. Соколов Г. Н., Лысак В. И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. Волгоград: ВолгГТУ, 2005. 284 с.
6. Миличенко С. Л., Гамов Н. С., Гамов А. А. Методика определения упругопластических свойств наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. С. 32—35.
7. Склерометрия. Теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием / Под ред. М. М. Хрущева. М.: Наука, 1968. 219 с.
8. Применение склерометрии для оценки механических свойств локальных зон сварных соединений / В. М. Матюнин, П. В. Волков, А. Н. Демидов и др. // Сварочное производство. 2011. № 1. С. 32—34.
9. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 216 с.
10. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Самарский ГТУ, 2008. 387 с.
11. Волосевич П. Ю., Беспалов С. А. Склерометрия и ее возможности в комплексном выявлении особенностей распределения элементов структуры, их механических характеристик и размерных параметров // Металлофизика и новые технологии. 2004. № 3. С. 343—359.
12. Исследование механизма абразивного изнашивания макрогетерогенных композитов склерометрическим методом / С. С. Затуловский, А. В. Косинская, А. Д. Костенко и др. // Процессы литья. 2008. № 3. С. 80—84.
13. Li J., Beres W. Three-dimensional finite element modeling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate // Wear. 2006. № 11—12. P. 1232—1243.
14. Rawers J. C., Tylczak J. H., Alman D. E. Wear evaluation of high interstitial stainless steel // Tribology transactions. 2008. № 51. P. 515—525.
15. Multicriteria optimization of mechanical and morphological properties of chromium electrodeposits under reverse pulse plating / L. Hallez, M. De Petris-Wery, M. Assoul et al. // Appl Electrochem. 2007. № 37. P. 843—852.
16. Соколов Г. Н. Свойства наплавленного металла, используемого для упрочнения металлургического инструмента // Автоматическая сварка. 2004. № 10. С. 62—64.
17. Исследование высокотемпературных свойств наплавленного металла методом склерометрии / И. Е. Лебедев, Г. Н. Соколов, И. В. Зорин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 1. С. 40—44.

УДК 621.791.05:620.179

**Н. А. Быстрая, д-р техн. наук,
Д. И. Галкин, канд. техн. наук, М. Е. Комов, канд. техн. наук
(ФГАУ НУЦСК при МГТУ им. Н. Э. Баумана),
Н. В. Крысько, асп., Г. А. Базарова, асп.
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)**

mgtu@sertink.ru



Н. А. Быстрая



Д. И. Галкин

ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Рассмотрены возможные виды образования трещин в зубчатых колесах вращающихся обжиговых печей. Оговорена проблема отсутствия на данный момент нормативной документации, устанавливающей требования к проведению диагностики зубчатых колес и нормы их допустимости. Описан опыт проведения ультразвуковой и магнитопорошковой дефектоскопии одного из таких зубчатых колес.

Ключевые слова: вращающиеся обжиговые печи, зубчатые колеса, нормативно-техническая документация, ультразвуковой контроль, магнитопорошковый контроль.