

УДК 620.178.162.42; 620.178.167.3; 620.178.751

## ИЗНОС ПАР СУХОГО ТРЕНИЯ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ ХРОМОВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ И ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

О. И. Стояновский, В. Г. Галуцкий, Д. И. Котов

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики  
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: stn@sibexplo.com, 175005@ngs.ru, lightstrikes@yandex.ru

На установке для исследования трения, на которой осуществляется возвратно-поступательное движение со скоростью 0,1 м/с образца из высокоуглеродистой хромо-ванадиевой стали относительно таблеток из твердых сплавов МС221, ВКЗМ и ВК60М выполнены исследования износостойкости стали марок ДИЗ7-ВИ и ЭК80-ВИ при длине базового пути трения 50 км и средних температурах образцов 100, 140, 190 °С. Изучено влияние средней температуры образцов на износостойкость стали марок ДИЗ7-ВИ и ЭК80-ВИ.

Ключевые слова: износостойкость, сухое трение, удельная нагрузка, хром, ванадий, карбиды.

DOI: 10.15372/PMTF20220215

**Введение.** Многочисленные исследования процессов трения и износа показали, что в результате трения формируется градиентная структура, состоящая из слоев с различной степенью деформации. Установлено, что деформирование представляет собой периодический процесс накопления деформации и разрушения поверхностного слоя [1]. Износ материала зависит от структуры и толщины сильнодеформированного, фрагментированного поверхностного слоя. Установлено, что высокие степени деформации обусловлены “ротационным” массопереносом, который приводит к образованию в поверхностном слое фрагментированной структуры, вследствие чего возможно недислокационное скольжение под действием сил трения [2].

Мартенситные стали, легированные хромом и ванадием, после термообработки плохо поддаются шлифовке, что является косвенным подтверждением их износостойкости при трении [3]. Прочность и износостойкость мартенсита определяются не только концентрацией в нем углерода, но и существенным влиянием элементов замещения на энергию взаимодействия атомов углерода с дислокациями, энергию дефектов упаковки и силы связи в решетке  $\alpha$ -фазы. Следовательно, оптимальное легирование мартенсита элементами замещения позволяет увеличить прочность и износостойкость рассматриваемой структуры [4, 5].

Вследствие увеличения интенсивности использования различного оборудования возрастает необходимость повышения износостойкости его деталей. Срок службы деталей

можно продлить за счет уменьшения шероховатости поверхности. При механическом износе большое влияние на износостойкость оказывает микрогеометрия поверхности. Для деталей, работающих на износ, существует оптимальный параметр шероховатости, при котором износ наименьший [6].

При оценке износостойкости сталей сложно учесть влияние температуры и деформации на структуру поверхностного слоя. Анализ причин износа также затруднен, что обусловлено недостаточным количеством экспериментальных данных о процессе протекания фазовых превращений в ограниченном объеме деформированного поверхностного слоя. Также необходимо учитывать, что на износостойкость стали влияют различные виды термической обработки [7].

Практически любое воздействие на материал узлов трения машин и механизмов передается через рабочую поверхность, поэтому ее свойства, как правило, определяют эксплуатационные характеристики всего изделия. Материал поверхностных слоев трущихся тел может существенно отличаться от исходных металлов. Это обусловлено тем, что металл взаимодействующих микронеровностей подвергается интенсивным внешним импульсным термомеханическим воздействиям. Поэтому структурно-фазовые превращения в зоне контакта трущихся тел могут существенно отличаться от физико-химических взаимодействий металлов в условиях, близких к равновесным [8].

Эффективность высокоуглеродистых хромистых сталей может быть увеличена путем дополнительного легирования. В качестве легирующих элементов, как правило, применяются молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, никель, марганец, медь. Экспериментально установлено, что одним из наиболее эффективных легирующих элементов является молибден. Однако его влияние на износостойкость высокоуглеродистых и высокохромистых сталей до сих пор не изучено, что приводит к противоречивым результатам оценки влияния дополнительного легирования на износостойкость узлов трения, работающих в различных средах [8].

Установлено, что ванадий, в отличие от молибдена, повышает абразивную износостойкость и уровень деформационного упрочнения высокоуглеродистого мартенсита. В стали, содержащей ванадий, наблюдается повышенное двойникование мартенситных кристаллов [9, 10].

При анализе результатов испытаний на абразивный износ следует отметить отсутствие непосредственной связи между твердостью и абразивной износостойкостью исследуемых сталей, причем как закаленных неотпущенных, так и отпущенных при температурах более 300 °С. Таким образом, существенное улучшение триботехнических свойств сталей и сплавов возможно путем оптимизации структурных превращений, происходящих в поверхностном слое сталей при контактном нагружении [11].

**1. Материалы и методы исследования.** Для проведения исследований на износостойкость использовались высокоуглеродистые мартенситные стали, характеристики которых приведены в табл. 1 ( $C$  — объемная доля элемента,  $T_{\text{отп}}$  — температура тройного отпуска, HRC — твердость).

Таблица 1

Характеристики исследуемых сталей

Марка стали	$C$ , %		$T$ , °С	HRC
	$C$	$V$		
ДИ37-ВИ (11X4B2MФ3C2)	1,05 ÷ 1,15	2,76	525	62
ЭК80-ВИ (95X6M3Ф3СТ)	0,92 ÷ 1,00	2,80	510	63 ÷ 64

Изучалась износостойкость сталей на установке для исследования трения [12], на которой осуществляется возвратно-поступательное движение образца стали относительно таблеток из твердых сплавов (ТТС) МС221, ВК3М и ВК6ОМ. Постоянная скорость 0,1 м/с обеспечивалась кулачковым механизмом на участке, длина которого составляла 70 % длины пути, на двух других участках равной длины происходили разгон и торможение ползуна, на котором закреплен образец исследуемой стали. Удельная нагрузка составляла 40 МПа. Средняя температура ползуна и образца с помощью тэнов, термопары и регулятора температуры составляла  $\pm 1$  °С от температуры испытаний при установившемся режиме (при выходе на температурный режим —  $\pm 3$  °С). Износ образцов и таблеток измерялся в миллиметрах с помощью точечного микрометра и координатного столика с ценой деления при перемещении 0,05 мм. При этом измерялась длина (в направлении, поперечном направлению движения ползуна) профилей канавки и таблетки, поверхность которых была не плоской, а с множеством дефектов глубиной приблизительно 0,01 мм. С помощью программы OriginPro70 результаты точечных измерений (не менее 20) методом наименьших квадратов аппроксимировались полиномами 4–8-го порядка.

**2. Результаты исследования и их обсуждение.** Ниже приводятся результаты исследования сухого трения стали марок ДИ37-ВИ и ЭК80-ВИ при различных значениях температуры.

2.1. *Износостойкость при сухом трении стали марок ДИ37-ВИ и ЭК80-ВИ с ТТС МС221.* Пары трения, содержащие сталь марок ДИ37-ВИ и ЭК80-ВИ, являются наиболее износостойкими [13, 14].

Согласно данным, приведенным на рис. 1, а и в табл. 2, износ стали марки ДИ37-ВИ при работе в паре с ТТС МС221 является максимальным при температуре  $T = 100$  °С,

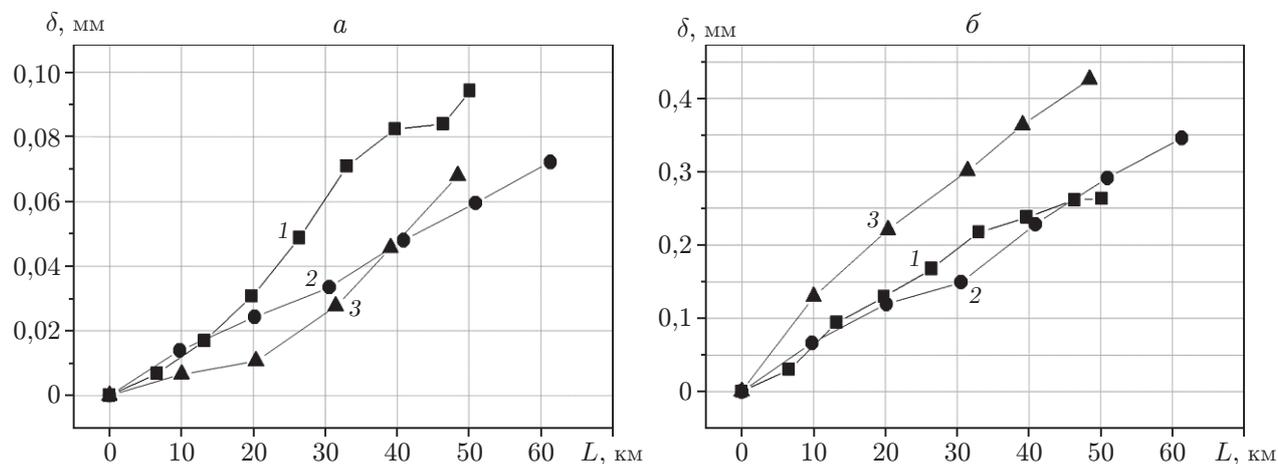


Рис. 1. Износ  $\delta$  стали марки ДИ37-ВИ (а) и ТТС МС221 (б) при различных значениях температуры:

1 —  $T = 100$  °С, 2 —  $T = 140$  °С, 3 —  $T = 190$  °С

Таблица 2  
Износ стали марки ДИ37-ВИ в паре с ТТС МС221

$T, ^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ мм при } L = 48 \text{ км}$	
	ДИ37-ВИ	ТТС МС221
100	0,0900	0,260
140	0,0565	0,280
190	0,0640	0,425

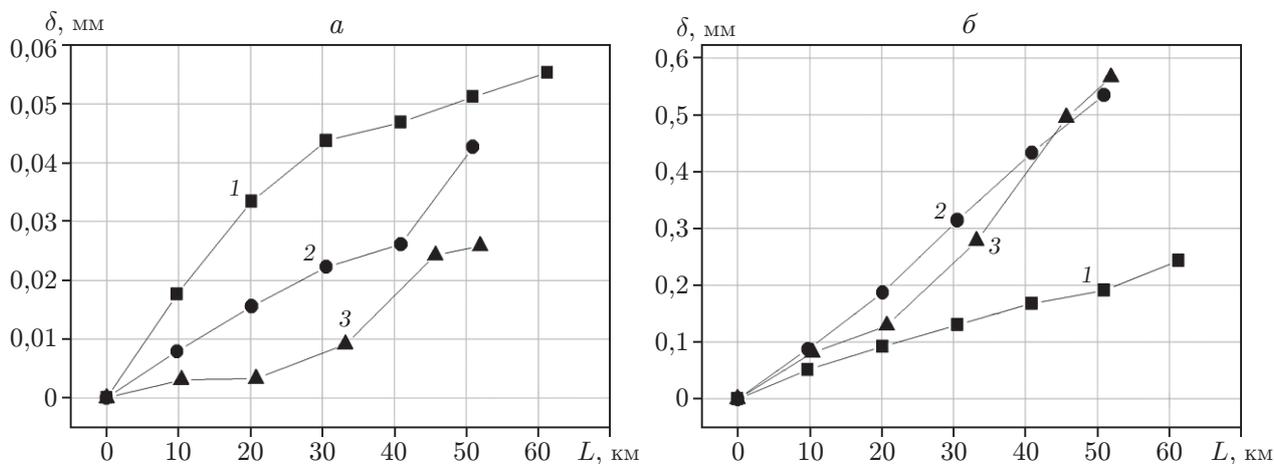


Рис. 2. Износ  $\delta$  стали марки ЭК80-ВИ (а) и ТТС МС221 (б) при различных значениях температуры:  
 1 —  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , 2 —  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$ , 3 —  $T = 190\text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 3  
 Износ стали марки ЭК80-ВИ в паре с ТТС МС221

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ мм при } L = 50 \text{ км}$	
	ЭК80-ВИ	ТТС МС221
100	0,051	0,187
140	0,042	0,522
190	0,026	0,549

при  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$  он уменьшается, причем зависимость износа от длины пути трения практически линейная.

При  $L \leq 20$  км скорость износа стали была меньше при трех рассматриваемых значениях температуры, затем она увеличилась, став практически равной скорости износа при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , а в дальнейшем превысила скорость износа при  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$ .

Можно предположить, что при большей температуре в поверхностном слое на участке  $L = 0 \div 20$  км происходят изменения. Для ТТС, работающей в паре с образцами из стали марки ДИ37-ВИ, с увеличением температуры износ увеличивается.

В случае стали марки ЭК80-ВИ (рис. 2, а и табл. 3) при увеличении температуры износ уменьшается: при  $T = 190\text{ }^\circ\text{C}$  он меньше, чем при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , в 1,96 раза. Износ ТТС МС221 является наименьшим при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ , при увеличении температуры до значения  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$  он резко увеличивается в 3,75 раза.

Результаты сравнения рис. 1, б и рис. 2, б показывают, что максимальный износ ТТС МС221, работающей в паре с образцами из стали марки ЭК80-ВИ, в 1,57 раза превышает износ ТТС МС221, работающей в паре с образцами из стали марки ДИ37-ВИ.

2.2. Износостойкость при сухом трении стали марки ДИ37-ВИ в паре с ТТС ВКЗМ и ВК6ОМ. На рис. 3 и в табл. 4 приведен износ образцов из стали марки ДИ37-ВИ и ТТС ВКЗМ при различных значениях температуры. Износ образца является наибольшим при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ . При увеличении температуры до значений  $T = 140, 190\text{ }^\circ\text{C}$  происходит существенное уменьшение износа.

Износ ТТС ВКЗМ происходит неравномерно. При  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$  происходит незначительный равномерный износ (см. рис. 3, б). При увеличении температуры до значения  $T = 140\text{ }^\circ\text{C}$  износ резко возрастает, а при  $T = 190\text{ }^\circ\text{C}$  увеличивается незначительно по

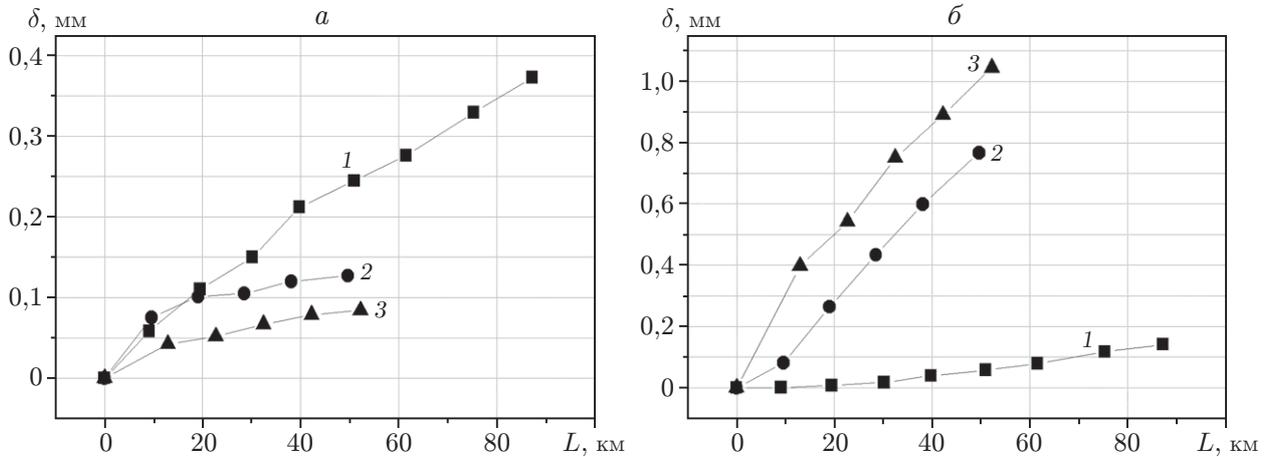


Рис. 3. Износ  $\delta$  стали марки ДИ37-ВИ (а) и ТТС ВК3М (б) при различных значениях температуры:

1 —  $T = 100^\circ\text{C}$ , 2 —  $T = 140^\circ\text{C}$ , 3 —  $T = 190^\circ\text{C}$

Таблица 4

Износ стали марки ДИ37-ВИ в паре с ТТС ВК3М

$T, ^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ мм при } L = 50 \text{ км}$	
	ДИ37-ВИ	ТТС ВК3М
100	0,240	0,06
140	0,125	0,77
190	0,081	1,06

сравнению с износом при  $T = 140^\circ\text{C}$ . В рассматриваемом случае имеет место резкое увеличение износа при увеличении температуры лишь на  $40^\circ\text{C}$ . Это позволяет сделать предположение о существовании значения температуры, при котором невозможно использовать ТТС ВК3М с образцами из стали марки ДИ37-ВИ при давлении 40 МПа. Измеряемая средняя температура образца значительно отличается от температуры в зоне контакта образца и ТТС, что подтверждают цвета побежалости, наблюдающиеся на поверхности образца вблизи канавки, образовавшейся в результате трения. По-видимому, увеличение температуры в зоне контакта при давлении 40 МПа может превышать среднюю температуру образцов более чем на  $100^\circ\text{C}$ .

На рис. 4,а показан износ стали марки ДИ37-ВИ в паре с ТТС ВК60М, на рис. 4,б — износ ТТС при изменении температуры образцов.

Наименьший износ образца (0,0279 мм) наблюдается при  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $L = 50$  км, наибольший (0,0393 мм) — при  $T = 190^\circ\text{C}$ . Износ ТТС ВК60М при  $T = 100^\circ\text{C}$  и  $L = 50$  км составил 0,685 мм, при  $T = 140^\circ\text{C}$  — 1,0 мм, при  $T = 190^\circ\text{C}$  — 1,06 мм. Таким образом, с увеличением температуры износ ТТС ВК60М увеличивается.

На рис. 5,а показано, что наибольший износ образца выявлен при работе в паре с ТТС ВК3М, наименьший — при работе с ТТС ВК60М. Износ составил 0,028 мм, что в 8,6 раза меньше, чем в случае использования ТТС ВК3М, и в 7,5 раза меньше, чем в случае использования ТТС МС221.

При увеличении температуры образца до значения  $T = 140^\circ\text{C}$  (рис. 5,б) характер зависимости износа от длины пути трения не меняется. При этом износ образца в паре с ТТС ВК60М увеличился в 1,34 раза по сравнению со значением при  $T = 100^\circ\text{C}$ , износ образца в паре с ТТС МС221 и ВК3М уменьшился в 1,9 и 1,92 раза соответственно.

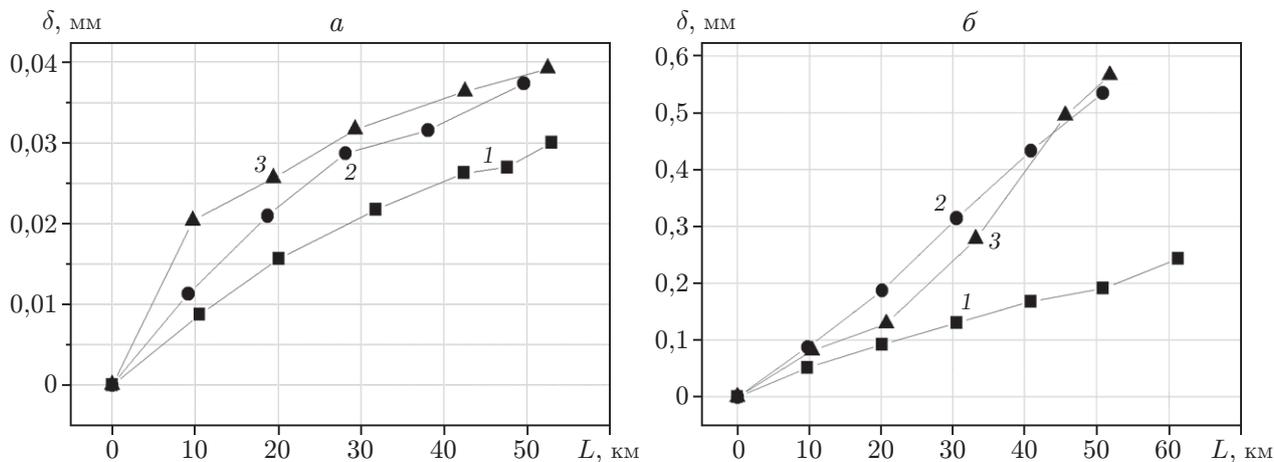


Рис. 4. Износ  $\delta$  стали марки ДИЗ7-ВИ (а) и ТТС ВК6ОМ (б) при различных значениях температуры:  
 1 —  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 —  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3 —  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$

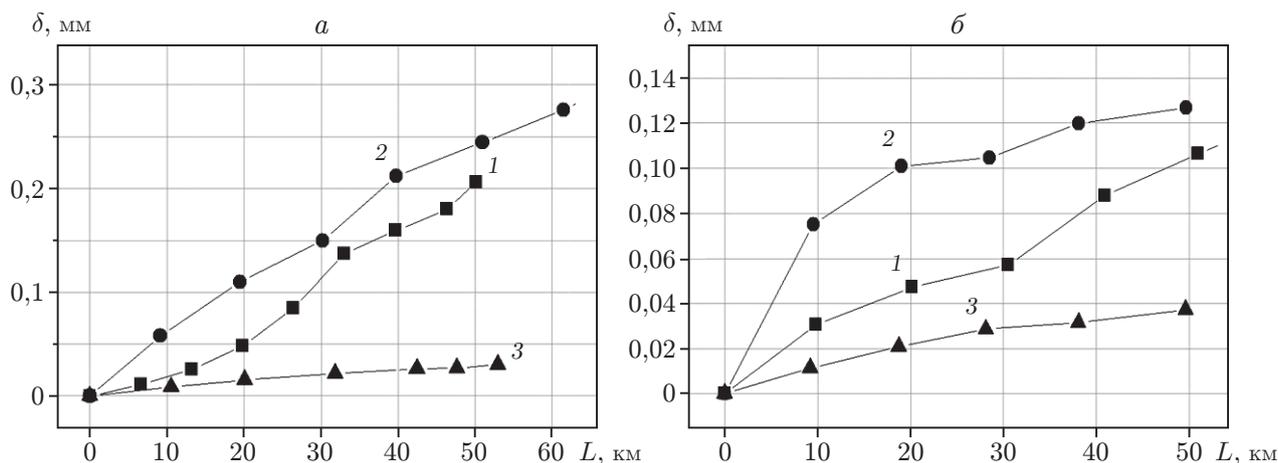


Рис. 5. Износ образцов из стали марки ДИЗ7-ВИ в паре с ТТС МС221 (1), ВК3М (2), ВК6ОМ (3) при различных значениях температуры:  
 а —  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , б —  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$

При увеличении температуры образца до значения  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 6) также произошли существенные изменения. Наименее значительные изменения наблюдаются в случае использования ТТС ВК6ОМ: износ увеличился на 2,6 % по сравнению со значением при  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При использовании ТТС ВК3М износ уменьшился на 36 % по сравнению со значением при  $T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее существенные изменения произошли при использовании ТТС МС221. На участке  $L = 0 \div 20\text{ км}$ , по-видимому, в результате трения на поверхности образца образовался слой, износ которого составил 0,01 мм, что меньше износа  $\delta = 0,023\text{ мм}$  в случае использования ВК6ОМ. Затем, возможно, произошло разрушение сформировавшегося слоя, и в дальнейшем износ происходил с постоянной скоростью 0,0035 мм/км, что в семь раз больше, чем на начальном участке.

При  $L = 48\text{ км}$  и  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$  наименьший износ, равный 0,039 мм, наблюдается у образца из стали марки ДИЗ7-ВИ в паре с ТТС ВК6ОМ. Износ образца в паре с ТТС ВК3М составил 0,081 мм. Наибольший износ  $\delta = 0,114\text{ мм}$  наблюдается у образца в паре с ТТС МС221.

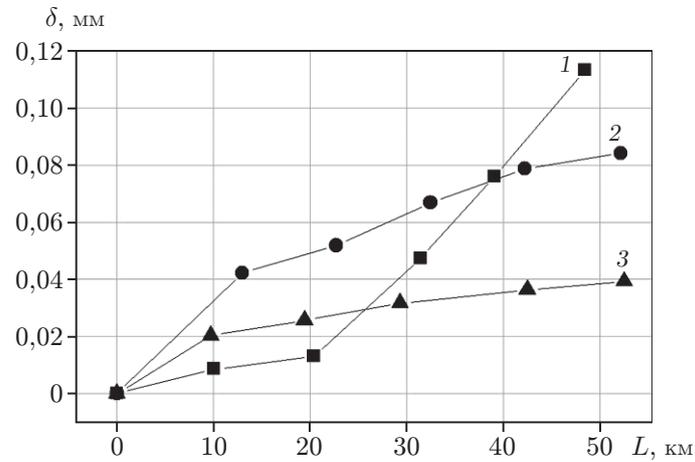


Рис. 6. Износ образцов из стали марки ДИЗ7-ВИ в паре с ТТС МС221 (1), ВКЗМ (2), ВК6ОМ (3) при  $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 5

Износ ТТС в паре с образцами из стали марки ДИЗ7-ВИ

ТТС	$\delta$ , мм		
	$T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$
МС221	0,260	0,28	0,425
ВКЗМ	0,060	0,77	1,030
ВК6ОМ	0,685	1,00	1,060

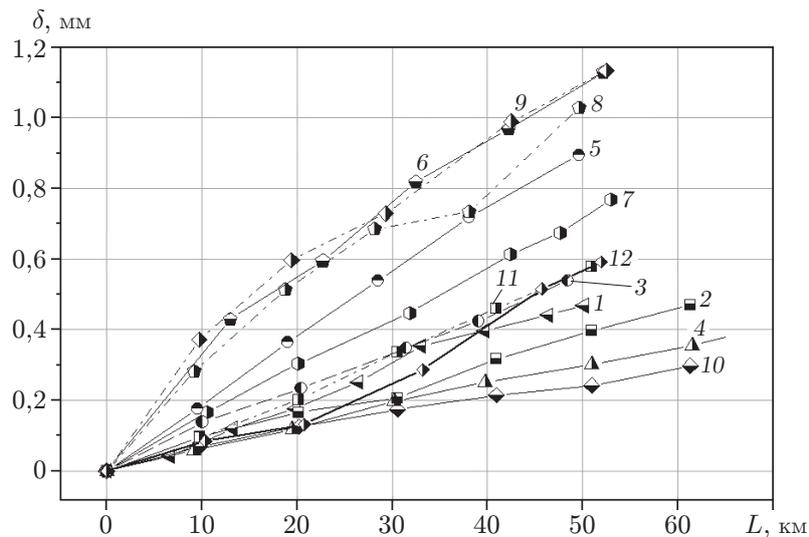


Рис. 7. Износ пар трения:

1-3 — ДИЗ7-ВИ и МС221 (1 —  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2 —  $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3 —  $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 4-6 — ДИЗ7-ВИ и ВКЗМ (4 —  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 —  $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , 6 —  $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 7-9 — ДИЗ7-ВИ и ВК6ОМ (7 —  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 8 —  $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , 9 —  $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 10-12 — ЭК80-ВИ и МС221 (10 —  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 11 —  $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , 12 —  $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ )

В табл. 5 приведены значения износа ТТС МС221, ВКЗМ, ВК60М при работе в паре с образцами из стали марки ДИЗ7-ВИ.

На рис. 7 показан износ рассматриваемых образцов при работе в паре с различными ТТС. С использованием приведенных данных можно определять ресурс пары трения в километрах при нагрузке 40 МПа, скорости относительного движения образцов и ТТС 0,1 м/с и средних температурах образцов  $T = 100, 140, 190$  °С. Следует отметить, что пары трения 1, 2, 4, 10 при среднем износе  $\delta = 0,5$  мм имеют ресурс не менее 50 км, а пары трения 2, 4, 10 — не менее 60 км.

**Заключение.** В работе изучен износ пар сухого трения, состоящих из высокоуглеродистых хромованадиевых сталей и твердых сплавов. Исследование износостойкости пар проведено при различных значениях температуры. Результаты исследования могут быть использованы при выборе наиболее износостойких пар трения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колубаев А. В., Тарасов С. Ю., Сизова О. В. и др. Эволюция структуры поверхностного слоя металлов в условиях трения скольжения // Трение и износ. 2007. Т. 28, № 6. С. 582–590.
2. Панин В. Е., Колубаев А. В., Слосман А. И. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики // Физ. мезомеханика. 2000. № 3. С. 67–74.
3. Позняк Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрынченко, С. И. Тишаев. М.: Металлургия, 1980.
4. Макаров А. В., Коршунов Л. Г., Солодова И. Л. Износостойкость и деформационное упрочнение углеродистых и низколегированных инструментальных сталей в условиях трения скольжения с большими контактными нагрузками // Трение и износ. 2000. Т. 21, № 5. С. 501–510.
5. Макаров А. В., Коршунов Л. Г., Химич Г. Л. и др. Влияние обработки непрерывным излучением лазера на износостойкость низкоуглеродистых сталей // Трение и износ. 1987. Т. 8, № 2. С. 293–301.
6. Marchenko D., Artyukh V., Matvyeyeva K. Analysis of the influence of surface plastic deformation on increasing the wear resistance of machine parts // Problems Tribology. 2020. N 2/96. С. 6–11.
7. Квеглис Л. И., Темных В. И., Рубцов И. Н. и др. Структурные и магнитные превращения в аустенитной стали 110Г13Л при динамическом нагружении // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2010. № 7. С. 1–6.
8. Коршунов Л. Г., Макаров А. В., Осинцева А. Л. Исследование износостойкости и структурных превращений при абразивном изнашивании стали У8, упрочненной лазером // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 1. С. 52–59.
9. Тихонович В. В. Влияние легирования хромистых сталей молибденом на формирование износостойких сверхмелкозернистых покрытий при работе узлов трения в разных технологических средах // Металлофизика и новейшие технологии. 2019. № 9. С. 1231–1260.
10. Макаров А. В., Насонов С. П., Коршунов Л. Г. и др. Влияние дополнительного легирования ванадием и молибденом на структуру и износостойкость высокоуглеродистой мартенситной стали // Физика металлов и металловедение. 1997. Т. 83, вып. 2. С. 128–137.
11. Коршунов Л. Г., Макаров А. В., Черненко Н. Л. Структурные аспекты износостойкости сталей мартенситного класса // Физика металлов и металловедение. 1994. Т. 78, вып. 4. С. 128–146.

12. **Заявка 2020120734 РФ, МПК G 01 N 3/56.** Установка для испытания пары сухого трения на износ при возвратно-поступательном движении / О. И. Стояновский, В. Г. Галуцкий, А. Ф. Черендин; Заявл. 16.06.2020.
13. **Стояновский О. И., Мазничевский А. Н., Пикаревский А. А., Васюкова Е. С.** Износостойкость ножей из стали марки ДИЗ7-ВИ (11Х4В2МФ3С2-ВИ) при резке с добавлением абразива // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 3. С. 129–140.
14. **Разработка** технологии изготовления заготовок из сталей трех марок, апробация разработанной технологии и изготовление опытной партии заготовок: Заключ. отчет о науч.-исслед. работе / ООО “Ласмет”; Руководители А. Н. Мазничевский, О. И. Стояновский, И. М. Котов. Контракт ЛЕ-09-2014. Челябинск, 2015.

*Поступила в редакцию 24/ХІІ 2020 г.,  
после доработки — 1/ІІІ 2021 г.  
Принята к публикации 29/ІІІ 2021 г.*

---