

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.1.09

УДК 621.89; 669.01

В.В. Зелинский, Е.А. Борисова, А.В. КарповМуромский институт (филиал) Владимирского государственного университета
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Муром, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННО-АДГЕЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПАРАХ ТРЕНИЯ СТАЛЬ–СТАЛЬ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МАШИН**

В рамках определенной группы технологических машин изучается проблема повышения износостойкости исполнительных органов, которые, выполняя функции захвата-подачи, давления и резания, образуют с предметом труда пары трения сталь–сталь.

Выдвинута гипотеза о том, что изнашивание исполнительных органов обусловлено образованием в процессе трения дисперсных вторичных микроструктур с повышенной твердостью в результате химических процессов с созданием прочных ковалентных связей. При этом исходными реагентами являются карбидообразующие химические элементы материала исполнительных органов, перенос которых в решетку сопряженного тела реализуется диффузионными и адгезионными процессами.

Экспериментальное моделирование процессов массопереноса и образования изнашивающих дисперсных твердых частиц достигается воспроизведением этих явлений в условиях детерминированного трения на примере трибосистемы высоколегированная сталь Р6М5–углеродистая сталь. При этом изучается возможность снижения износа индентора путем его намагничивания в импульсном магнитном поле, с основой на использовании магнитного воздействия как энергетического фактора в управлении процессом массопереноса в зоне взаимодействия сопряженных кристаллических решеток.

По результатам измерения микротвердости выявлено образование вторичных структур с высокой твердостью, недостижимой для деформационного упрочнения. Делается вывод о решающей роли в их образовании механизма твердорастворного упрочнения, инициированного эффектом самоорганизации при трении как термодинамического явления.

В ходе изучения элементного содержания поверхностного слоя контртела методом спектрального анализа с использованием спектрометра Q4 TASMАN установлена принципиальная возможность переноса при трении карбидообразующих элементов из индентора в контртело посредством диффузии и адгезии. Представлены результаты оценки влияния магнитной обработки индентора на эффективность переноса этих элементов (в 7–20 раз).

В результате использования экспериментальных результатов и основ материаловедения и трибологии показано, что твердыми вторичными структурами могут быть карбидные фазы и интерметаллиды с повышенной долей ковалентной связи, свойственной именно этим химическим соединениям.

Ключевые слова: трение, микротвердость, адгезия, трибосистема, решетка, атом, энергия, диффузия, элемент, поверхность, хром, вольфрам.

V.V. Zelinskyi, E.A. Borisova, A.V. KarpovMurom Institute (branch) of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs,
Murom, Russian Federation**SIMULATION OF DIFFUSION-ADHESION PROCESSES IN FRICTION STEEL
STEEL-STEEL OF THE WORKING PARTS OF MACHINES**

For a certain group of technological machines, the problem of increasing the wear resistance of working parts is studied, which, performing the functions of grip-feed, pressure and cutting, form pairs of friction steel-steel with the object of labor.

A hypothesis has been put forward that the wear of the working parts is due to the formation in the process of friction of dispersed secondary microstructures with increased hardness as a result of chemical processes with the creation of strong covalent bonds. In this case, the initial reagents are carbide-forming chemical elements of the material of the working parts, the transfer of which into the lattice of the conjugated solid is realized by diffusion and adhesion processes.

Experimental modeling of mass transfer processes and the formation of wear-out dispersed solid particles is achieved by reproducing these phenomena in conditions of deterministic friction using the example of the tribosystem high-alloy steel R6M5-carbon steel. In this case, the possibility of reducing the wear of the indenter by magnetizing it in a pulsed magnetic field is studied, based on the use of magnetic influence as an energy factor in controlling the process of mass transfer in the interaction zone of conjugated crystal lattices.

Based on the results of microhardness measurements, the formation of secondary structures with high hardness, unattainable for strain hardening, was revealed. The conclusion is made about the decisive role in their formation of the mechanism of solid-solution hardening, initiated by the effect of self-organization in friction as a thermodynamic phenomenon.

By studying the elemental content of the surface layer of the counterbody by spectral analysis using the Q4 TASMAR spectrometer, the principle possibility of transferring the carbide-forming elements from the indenter to the counter-body by diffusion and adhesion is established. The results of the evaluation of the effect of magnetic processing of the indenter on the transfer efficiency of these elements (in 7–20 times) are presented.

Using experimental results and the foundations of materials science and tribology, it was shown that solid secondary structures can be carbide phases and intermetallides with an increased fraction of the covalent bond characteristic of these chemical compounds.

Keywords: friction, microhardness, adhesion, tribo-system, lattice, atom, energy, diffusion, element, surface, chromium, tungsten.

Введение

Среди машин производственного назначения обширную группу представляют технологические машины, у которых основными исполнительными органами (ИО) являются инструменты, выполняющие функции захвата, давления и резания. В эту группу входят машины-автоматы для холодной навивки пружин, у которых ИО являются захватывающие и подающие ролики. В отмеченную группу входят разнообразные гибочные и прокатные машины, у которых ИО являются подающие и формирующие ролики с разнообразной геометрией давящей поверхности. К ней относятся также металлорежущие станки и пресловое оборудование, у которых исполнительными органами являются фрезы, резцы, штамповая оснастка.

Обособленность отмеченной группы машин вызвана тем, что их исполнительные органы с предметом труда образуют пару трения сталь–сталь с интенсивным пластическим деформированием в зоне локального контакта. При этом индентором трибосистемы является захватывающий, давящий или режущий инструмент из легированной стали, а контртелом – захватываемый или обрабатываемый материал из углеродистой стали.

Общим для трибосистем сталь–сталь является неизбежное образование особого вида изнашивания – изнашивание при схватывании (ГОСТ 27674–88). Это наиболее опасный и быстротечный вид изнашивания, сопровождаемый вырывом материала и его переносом с одной поверхности на другую в результате диффузии и адгезии с образованием твердых вторичных структур. Эти процессы особенно активны на фоне пластического сдвига и непрерывного образования дефектов кристаллического строения на химически чистых микроучастках поверхностей.

Таким образом, для отмеченной группы технологических машин с трибосистемами (ТМТС) работоспособность в значительной степени связана с износостойкостью исполнительных органов, повышение которой является актуальной задачей. Целесообразным для таких условий является использование методов снижения износа, связанных с энергетическим влиянием на взаимодействие атомно-электронных структур сопряженных решеток. К ним относится метод обработки магнитным полем (ОМП). Механизм влияния метода и возможности его использования изучены недостаточно.

Целью работы является экспериментальное моделирование диффузионно-адгезионных процессов в паре трения высоколегированная сталь–углеродистая сталь и образования в материале контртела вторичных структур повышенной твердости с оценкой влияния магнитной обработки индентора на эти процессы.

Исходные предпосылки

Результаты анализа опыта эксплуатации и экспериментальных исследований по изнашиванию с учетом вида ТМТС и конструкции наиболее изнашиваемого исполнительного органа представлены в табл. 1. Типичными сталями для исполнительных органов ТМТС являются низко-, средне- и высоколегированные конструкционные и инструментальные стали.

Таблица 1

Преобладающий вид изнашивания и применяемые стали для наиболее изнашиваемых исполнительных органов

№ п/п	Вид технологической машины (ТМТС)	Наиболее изнашиваемые исполнительные органы	Преобладающий вид изнашивания	Применяемая сталь для исполнительных органов
1	Пружинно-навивочные машины	Подающие ролики	Адгезионный	Низко- и среднелегированные конструкционные и инструментальные (хромистые, хромовольфрамовые) – 40Х, 38ХС, 9ХС, ХВГ, 6ХВ2С
2	Машины для гибки и проката	Формующие ролики	Адгезионный, абразивный	
3	Металлорежущие станки	Фрезерный инструмент	Адгезионный, абразивный	Высоколегированные инструментальные (быстрорежущие) – Р18, Р6М5

Общим для исполнительных органов технологических машин, образующих трибосистему сталь–сталь, является непрерывное обновление атомных структур поверхностного слоя решетки контртела в контакте с необновляющимися участками кристаллической решетки индентора. В таких случаях доминирующую роль начинает играть структурная приспособляемость трибосистемы [1] как комплекс явлений, связанных с преобразованиями на нано-, мезо- и микроструктурном уровнях, в основном в наименее прочной из трущихся поверхностей.

Структурная приспособляемость при трении возникает в результате воздействия на трущийся контакт энергетического поля от теплового и силового воздействий. В зоне соприкосновения решеток при пластическом сдвиге в результате действия энергетического поля от трибовоздействия частично утрачиваются связи между атомами и электронами, свойственными кристаллическому строению тел. Создается неустойчивое структурно-энергетическое состояние, соответствующее псевдокристаллическому строению вещества с наличием элементов аморфизации. В межрешеточном пространстве образуется третье тело, проявляющее себя как открытая термодинамическая система, в которой происходит обмен веществом и энергией по законам термодинамики.

В таких условиях включаются механизмы перемещения атомов легирующих химических элементов между решетками, основанные на градиенте химических потенциалов. К ним относятся диффузия и адгезия.

Одновременно в связи со структурно-энергетическим неустойчивым состоянием третьего тела в нем могут проявиться явления самоорганизации, существование которых установлено в триботехнических системах [1, 2]. Суть самоорганизации в трибосистеме основана на принципе Ле-Шателье, который состоит в том, что внешнее энергетическое воздействие, выводящее трибосистему из равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия. Трибосистема, как любая открытая термодинамическая система, перестраивается для защиты от внешнего трибовозмущения. Перестройка состоит в прохождении преобразовательных процессов на нано- и мезоструктурном уровнях с образованием защитных вторичных микроструктур в поверхностном слое. Очевидно, что более значительная часть преобразований происходит в решетке материала, испытывающего трибовозмущение в наибольшей степени. Иными словами, вторичные структуры образуются в поверхностном слое контртела из углеродистой стали. Защитные функции вторичных структур состоят в ограничении распространения трибовозмущения внутрь контртела, поэтому их появление соответствует принципу Ле-Шателье.

Проявление самоорганизации для пары сталь–сталь состоит прежде всего в мгновенном упрочнении соприкасающихся участков решетки материала контртела за счет формирования в нем новообразованных вторичных структур с повышенной прочностью.

Вклад различных механизмов упрочнения в предположении аддитивности их влияния на примере повышения предела текучести представляют следующей зависимостью [3]:

$$\sigma_T = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{тв.р}} + \Delta\sigma_{\text{д}} + \Delta\sigma_{\text{п}} + \Delta\sigma_{\text{ду}} + \sigma_3, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_0$ – напряжение трения решетки (напряжение Пайерлса–Набарро); $\Delta\sigma_{\text{тв.р}}$ – твердорастворное упрочнение; $\Delta\sigma_{\text{д}}$ – деформационное упрочнение; $\Delta\sigma_{\text{п}}$ – перлитное упрочнение; $\Delta\sigma_{\text{ду}}$ – упрочнение дисперсионными частицами; σ_3 – зернограничное упрочнение.

При трении кристаллических решеток углеродистой и легированной сталей в условиях структурно-энергетической неустойчивости в третьем теле наиболее легко достижимым является твердорастворное упрочнение.

Такое упрочнение реализуется в процессе диффузионно-адгезионного переноса и растворения в твердом растворе материала контртела легирующих элементов материала индентора по механизмам вакансионного замещения и внедрения. Твердорастворное упрочнение обусловлено возникновением вокруг атомов легирующих элементов полей упругих искажений решетки. При этом эффективность торможения дислокаций определяется разницей в размерах атома железа и легирующего элемента и, что очень важно, пропорциональна концентрации легирующего элемента в решетке растворителя (материале контртела). Важно отметить, что все легирующие элементы являются сильными карбидообразователями и наиболее активно это проявляют в углеродистых сталях с достаточным содержанием углерода [4, 5].

Перенесенные атомы легирующих элементов в решетке контртела могут вступить в химическое взаимодействие с углеродом, между собой и с атомами железа. Образованные при этом легированный цементит, сложные карбиды и интерметаллиды могут представлять собой вторичные структуры в виде твердых дисперсных частиц. Повышенная твердость может образоваться благодаря созданию химических связей с повышенной ковалентной компонентой [6, 7]. Вторичные структуры подобного типа оказывают на поверхность индентора абразивное воздействие.

Экспериментальные исследования

Благодаря экспериментальным исследованиям процесса изнашивания с применением метода ОМП образцов низко-, средне- и высоколегированных конструкционных и инструментальных сталей в условиях, приближенных к условиям работы исполнительных органов ТМТС, выявлены особенности процесса изнашивания, классифицирующие его как адгезионно-абразивный [8, 9]. Установлено, что принципиально ОМП позволяет снизить износ сталей 9ХС, 40Х, ХВГ и Р6М5 при трении о сталь 45 в 2,0; 2,2; 3,7 и 2,6 раза соответственно. Разработаны оптимальные режимы ОМП [10, 11, 12].

Непрерывное обновление слоев материала контртела в зоне контакта с индентором существенно увеличивает активность диффузионно-адгезионных процессов и образования вторичных структур. Но из-за малого времени контакта преобразованные слои в материале контртела имеют малую толщину. Исходя из этого даже рентгеноструктурный качественный анализ преобразованных слоев иногда дает результаты, лежащие в пределах ошибки обнаружения [13]. Однако при моделировании отмеченных преобразовательных процессов трением подвижного и неподвижного образцов, когда преобразования формируются в слоях значительной толщины, обновление материала контртела (за счет изнашивания) протекает значительно медленнее. Благодаря аддитивности повторяющихся термодинамических процессов, инициирующих массоперенос в третьем теле, происходит накопление различных перенесенных атомов индентора в решетке контртела. При этом концентрация химических элементов в поверхностном слое контртела, отличная от исходной, соответствует накопленным преобразованиям, произошедшим в результате явлений массопереноса. Суммарный результат массопереноса и образования твердых вторичных структур в этом случае можно подтвердить измерениями измененного эле-

ментного состава и микротвердости поверхности трения контртела. Такая оценка диффузионных и адгезионных преобразований считается достаточной и находит применение в исследованиях [13, 14].

На основании изложенного можно считать моделирование процессов массопереноса путем диффузии и адгезии с образованием вторичных структур при изнашивании исполнительных органов ТМТС воспроизведением тех же явлений в условиях детерминированного трения образцов соответствующих материалов достаточно корректным.

Экспериментальное моделирование проводилось путем триботехнических испытаний по схеме трения образец–диск с применением оптимальных режимов ОМП. В качестве неподвижных образцов (инденторов) использовались немагнитный (базовый) и магнитный образцы из стали Р6М5, вырезанные из периферийной части дисковой фрезы. Данная сталь была выбрана как типичная для высоколегированных сталей, из которых изготавливают исполнительные органы металлообрабатывающих машин. Подвижные образцы-диски (контртела) выполнялись из стали 45, которая относится к среднеуглеродистым сталям и в машиностроении считается эталонной. С целью максимального приближения детерминированного трения образцов к реальным условиям металлообработки длительность испытания для каждой пары образцов назначалась достаточно малой (1,75–2,0 мин).

Результаты измерения микротвердости, представленные на рис. 1, показали, что в поверхностном слое контртела после трения с базовым индентором произошли преобразования на микроструктурном уровне с общим повышением микротвердости до 4,5 раз по сравнению с исходным состоянием. При этом значительная часть результатов оказалась расположенной в нижней половине поля разброса значений, которые, видимо, обусловлены деформационным упрочнением при трении. Однако остальная часть результатов в верхней половине поля разброса недостижима для этого механизма ввиду высокой кратности упрочнения. Очевидно, что высокие значения микротвердости обусловлены массопереносом с образованием дисперсных частиц вторичных структур химического происхождения по механизму твердорастворного упрочнения на основе вакансионного замещения и внедрения.

Значения микротвердости поверхности контртела после трения с магнитным индентором также оказались более высокими по сравнению с исходным состоянием, но в существенно меньшей степени. При этом по сравнению с результатами для контртела после трения с базовым индентором значения микротвердости в среднем уменьшились более чем в 2 раза. Это указывает на практическое отсутствие дисперсных частиц вторичных структур. Результаты позволяют предполагать, что массоперенос и явления самоорганизации на основе химического твердорастворного упрочнения проявились очень слабо.

Таким образом, анализ возможных механизмов упрочнения для сталей, представленных формулой (1), показал, что наиболее возможным является твердорастворное упрочнение в результате массопереноса. Наиболее вероятное из числа других деформационное упрочнение не может дать такую высокую кратность увеличения твердости.

В результате измерения микротвердости сделан вывод о том, что при низкой плотности расположения вторичных структур химического происхождения точная количественная оценка результатов переноса карбидообразующих элементов с использованием рентгеноспектральных

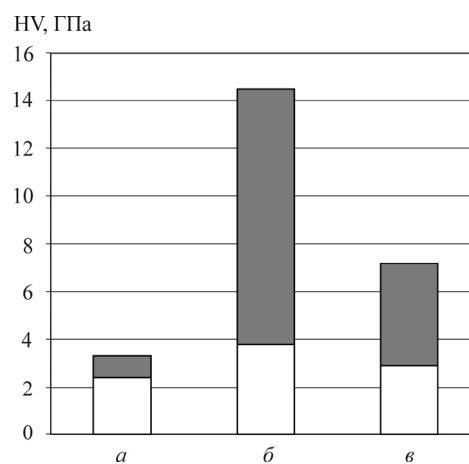


Рис. 1. Значения микротвердости поверхности контртела: а – в исходном состоянии; б – после трения с базовым индентором; в – с намагнитным индентором

микроанализаторов, дающих локальные (точечные) анализы, затруднительна. Оценка может оказаться в пределах ошибки обнаружения из-за очень малого диаметра (до 1 мкм) возбуждаемой зоны для взятия анализа. Исходя из этого, количественную оценку элементного содержания проводили на оптико-эмиссионном спектрометре Q4 TASMAR фирмы Bruker (Германия) с диаметром возбуждаемой зоны до 6 мм. Такая зона взятия анализа позволяет получить усредненные значения концентраций по достаточно большой площади поверхности. Благодаря обдувке зоны анализа аргоном метод обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов измерения. Такой спектрометр в типичных условиях анализа для легирующих химических элементов сталей имеет следующие пределы обнаружения в процентах: Cr – 0,000 005, Mn – 0,00 006, Mo – 0,0002, W – 0,0001, V – 0,00 004.

Выявление фактического переноса при трении из индентора в контртело для каждого карбидообразующего элемента производилось путем сравнения среднего значения (по 3–5 анализам) его измененной концентрации (взятием анализа в поверхностном слое дорожки трения на контртеле) с исходной концентрацией элемента в материале контртела как случайной примеси (взятием анализа на свободной поверхности контртела). Полный цикл измерения концентраций проводился для образцов, прошедших триботехнические испытания без применения ОМП (трение с базовым индентором) и с применением ОМП (трение с намагниченным индентором). Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Концентрация химических элементов в поверхностном слое дисков-контртел, прошедших трение с образцами-инденторами из стали Р6М5

Наличие ОМП	Вид концентрации в поверхностном слое	Химические элементы			
		Cr	Mo	W	V
Без проведения ОМП (трение с базовым индентором), диск 8–2	Исходная	0,053	0,0076	<0,005	0,0037
	Измененная (средняя)	0,105	0,0470	0,075	0,0293
С проведением ОМП (трение с намагниченным индентором), диск 9–2	Исходная	0,056	0,0070	<0,005	0,0030
	Измененная (средняя)	0,060	0,0122	0,0081	0,0062

Обсуждение и оценка результатов

Факт повышения измененной концентрации каждого элемента по сравнению с исходной концентрацией подтвердили все анализы. Разброс значений повторных анализов при испытаниях без ОМП для всех элементов составил в среднем около 20 %, при испытаниях с ОМП – около 10 %, что указывает на высокую воспроизводимость результатов.

Оценку эффективности увеличения содержания каждого карбидообразующего элемента в поверхностном слое контртела производили по показателю кратности K повышения средней измененной концентрации $C_{\text{изм.ср}}$ относительно исходной концентрации $C_{\text{исх}}$ по формуле

$$K = \frac{C_{\text{изм.ср}}}{C_{\text{исх}}}.$$

Значения показателя K по всем карбидообразующим элементам для трения без ОМП и с ОМП представлены на рис. 2.

Важный результат оценки по показателю K состоит в установлении факта, что без применения ОМП эффективность увеличения содержания в поверхностном слое индентора отдельных карбидообразующих элементов существенно различается. Наибольшую эффективность увеличения показали вольфрам ($K = 15$) и ванадий ($K = 7,93$), которые образуют металлические

соединения с повышенной твердостью. Для трения с интенсивной пластической деформацией сталей наиболее вероятно образование сложных карбидов и интерметаллидов. Сложные карбиды с наличием вольфрама и ванадия испытывают значительный недостаток по углероду и поэтому склонны к его заимствованию из углеродистой стали контртела [5, 15]. Видимо, наличием этих новообразованных вторичных структур и обусловлена повышенная микротвердость поверхности для случая трения образцов с базовым (ненамагниченным) индентором (см. рис. 1).

Действительно, объяснить увеличение микротвердости поверхностей трения в 4,5 раза только упрочняющим эффектом пластического деформирования при трении не представляется возможным. Известно, что для сталей в таких условиях максимальная кратность повышения твердости составляет 1,3–1,5. Следовательно, основной эффект упрочнения обусловлен процессами образования ковалентных связей во вторичных микроструктурах, а это возможно именно в карбидной фазе и интерметаллидах с присутствием Cr, Mo, W и V [15].

Для трения образцов с применением ОМП установлено, что увеличение содержания по всем элементам также происходило, но в значительно меньшей степени. Снижение концентрации Cr, Mo, W и V за счет применения ОМП произошло в 1,86; 3,53; 9,3 и 3,81 раза соответственно. Причем наибольший эффект снижения соответствует W и V, образующим соединения с наиболее высокой твердостью.

Таким образом, установлена принципиальная возможность существенного снижения эффективности увеличения концентрации всех карбидообразующих элементов в контртеле при трении за счет намагничивания индентора.

С учетом того, что результаты диффузии и адгезии являются функциями времени [16], важное значение представляет оценка эффективности массопереноса по дифференциальной (удельной) характеристике процесса в виде скорости накопления среднего прироста концентрации элементов в поверхностном слое во времени, которую можно представить в виде формулы

$$V_n = \frac{C_{\text{изм.ср}} - C_{\text{исх}}}{t}, \quad (2)$$

где t – длительность трения в постоянных условиях, мин.

Результаты оценки влияния ОМП на скорость накопления среднего прироста поверхностной концентрации по всем карбидообразующим элементам стали Р6М5 представлены на рис. 3.

Оценка эффективности переноса карбидообразующих элементов по дифференциальной характеристике также показала, что во вторичных структурах на поверхности контртела с наи-

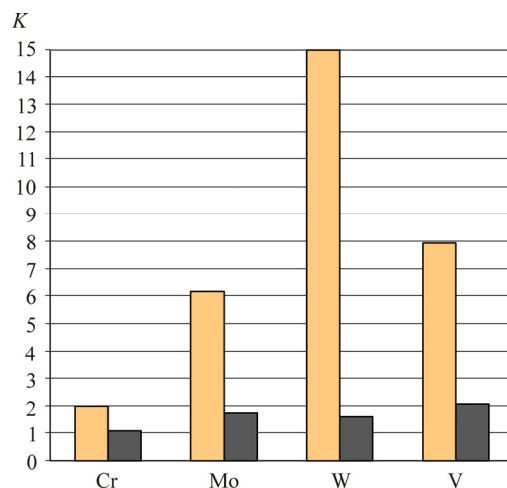


Рис. 2. Кратность повышения средней измененной концентрации элементов в поверхностном слое контртела с учетом проведения ОМП: ■ базовый индентор; ■ намагниченный индентор

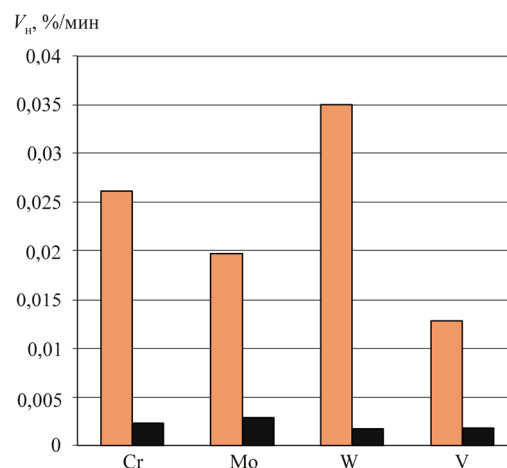


Рис. 3. Скорость накопления среднего прироста концентрации элементов в поверхностном слое контртела с учетом проведения ОМП: ■ базовый индентор; ■ намагниченный индентор

большой скоростью накапливается вольфрам. Хром, показавший несколько меньшую скорость накопления в поверхностном слое контртела, по размерам и недостроенности внешней d -оболочки атома очень близок к железу. Исходя из этого, следует ожидать в связи с его переносом в контртело образования в последнем легированного цементита и сложного карбида хрома. Оба новых для контртела вещества также имеют повышенную твердость.

Также важный результат состоит в том, что за счет намагничивания индентора эффективность переноса и накопления карбидообразующих элементов в материале контртела (следовательно, эффективность образования в нем твердых частиц, изнашивающих индентор) существенно снижается. Кратность снижения составляет для Cr – 11,34; Mo – 6,79; W – 20,1 и V – 7,11 раза.

Микроскопическим изучением поверхностей трения контртел после трения без применения и с применением ОМП не удалось обнаружить явных очагов адгезии, поэтому для выявления в массопереносе в том числе и адгезионных процессов использовали следующий подход.

В ранее проведенных в сопоставимых условиях триботехнических испытаниях [17] при изучении массопереноса в трибосистеме с индентором из среднелегированной стали ХВГ контртело имело более высокую твердость по сравнению с индентором. Это позволило на поверхности контртела создать явные очаги адгезии в виде наростов с повышенной твердостью.

По полученным ранее результатам с использованием формулы (2) проведена оценка диапазонов изменения скорости накопления среднего прироста концентраций V_n основных карбидообразователей Cr и W в контртеле при трении с индентором из стали ХВГ. Такая же оценка проведена по Cr, Mo, W и V при трении с индентором из стали Р6М5. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон изменения скорости накопления концентрации основных карбидообразователей в поверхностном слое контртела

Материал индентора	Наличие ОМП	Диапазон изменения V_n , %/мин
Сталь ХВГ	без ОМП	0,0110–0,0209
	с ОМП	0,034–0,0038
Сталь Р6М5	без ОМП	0,0128–0,0350
	с ОМП	0,0017–0,0029

Сравнение диапазонов изменения V_n при трении с инденторами из сталей ХВГ и Р6М5 при испытаниях без ОМП и с ОМП показывает, что соответствующие диапазоны очень близки. При этом в результате трения со сталью ХВГ очаги адгезии на контртеле были явно зарегистрированы, что указывает на наличие в массопереносе явлений диффузии и адгезии. Близкие значения диапазонов изменения V_n косвенно показывают, что в трибосистеме с индентором из стали Р6М5 массоперенос осуществлялся также посредством не только диффузионных, но и адгезионных процессов.

Заключение

1. В результате экспериментального моделирования на примере пары трения высоколегированная сталь–углеродистая сталь показана принципиальная возможность:

- переноса карбидообразующих элементов из индентора в поверхностный слой контртела посредством диффузии и адгезии;
- образования в контртеле твердых дисперсных вторичных структур по механизму твердорастворного упрочнения на основе явления самоорганизации при трении;
- существенного снижения эффективности массопереноса при трении за счет обработки индентора магнитным полем.

2. Предложена расчетная дифференциальная характеристика для оценки эффективности массопереноса при трении посредством диффузии и адгезии.

3. На основе экспериментов показано, что за счет намагничивания индентора кратность снижения концентрации в поверхностном слое контртела составляет для Cr – 11,34; Mo – 6,79; W – 20,1 и V – 7,11 раза.

Список литературы

1. Иванова В.С., Буше Н.А., Гершман И.С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 1. – С. 74–79.
2. Самоорганизация вторичных структур при трении / И.С. Гершман, Н.А. Буше, А.Е. Миронов, В.А. Никифоров // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 3. – С. 329–334.
3. Хецберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: пер. с англ. / под ред. И.Л. Бернштейна и С.П. Ефименко. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
4. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стер. – М.: Изд-во Москов. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: моногр. – Омск: Изд-во Ом. гос. техн. ун-та, 2013. – 240 с.
7. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
8. Зелинский В.В., Борисова Е.А. Установление преобладающих видов и причин изнашивания режущих инструментов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 2(12). – С. 55–60.
9. Зелинский В.В., Борисова Е.А. Атомно-электронный подход к повышению износостойкости трибосистем с ферромагнитными материалами [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/125-19922> (дата обращения: 24.06.2015).
10. Borisova E.A., Zelinskiy V.V. On the mechanism of ferromagnetic materials wear reduction // Procedia Engineering. – 2015. – № 129. – P. 111–115.
11. Зелинский В.В., Борисова Е.А. О механизме снижения износа ферромагнитных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 2, № 2. – С. 51–59.
12. Зелинский В.В., Борисова Е.А. Опытная оценка влияния магнитной обработки на износостойкость инструментальных сталей // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 3. – С. 55–60.
13. Липатов А.А. Моделирование диффузионных процессов в контакте твердый сплав–сталь // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та. Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2008. – Вып. 4, № 9(47). – С. 22–26.
14. Булычев В.В. Исследование процессов схватывания металлов при трении как фазового перехода первого рода // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 11–4. – С. 9–14.
15. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
16. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
17. Зелинский В.В., Степанов Ю.С., Борисова Е.А. Влияние обработки магнитным полем на износ инструментальных сталей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 2 (322). – С. 73–81.

References

1. Ivanova V.S., Bushe N.A., Gershman I.S. Strukturnaia prisposablivaemost' pri trenii kak protsess samoorganizatsii [Structural adaptability at friction as self-organization process]. *Trenie i iznos*, 1997, vol. 18, no. 1, pp. 74–79.
2. Gershman I.S., Bushe N.A., Mironov A.E., Nikiforov V.A. Samoorganizatsiia vtorichnykh struktur pri trenii [Self-organization of secondary structures at friction]. *Trenie i iznos*, 2003, vol. 24, no. 3, pp. 329–334.

3. Khetsberg R.V. Deformatsiia i mekhanika razrusheniia konstruksionnykh materialov [Deformation and mechanics of destruction of constructional materials]. Ed. I.L. Bernshteina i S.P. Efimenko. Moscow: Metallurgii, 1989, 576 p.
4. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G. at al. Materialovedenie [Materials science]. Ed. B.N. Arzamasova, G.G. Mukhina. 8nd. ed. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana, 2008, 648 p.
5. Guliaev A.P. Metallovedenie [Metallurgical science]. 6nd ed. Moscow: Metallurgii, 1986, 544 p.
6. Mashkov Iu.K. Tribofizika metallov i polimerov [Tribofizika of metals and polymers]. Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2013, 240 p.
7. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Struktura i iznosostoiost' metalla [Structure and wear resistance of metal]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 212 p.
8. Zelinskii V.V., Borisova E.A. Ustanovlenie preobladaiushchikh vidov i prichin iznashivaniia rez-hushchikh instrumentov [Establishment of the prevailing types and reasons of wear of the cutting tools]. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2012, no. 2(12), pp. 55–60.
9. Zelinskii V.V., Borisova E.A. Atomno-elektronnyi podkhod k povysheniiu iznosostoiosti tribosistem s ferromagnitnymi materialami [Atomic and electronic approach to increase in wear resistance tribosisty with ferromagnetic materials]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 1, available at: <http://www.science-education.ru/125-19922> (accessed 24 June 2015).
10. Borisova E.A., Zelinskiy V.V. On the mechanism of ferromagnetic materials wear reduction. *Procedia Engineering*, 2015, no. 129, pp. 111–115.
11. Zelinskii V.V., Borisova E.A. O mekhanizme snizheniia iznosa ferromagnitnykh materialov [About the mechanism of decrease in wear of ferromagnetic materials]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 51–59.
12. Zelinskii V.V., Borisova E.A. Opytnaia otsenka vliianiia magnitnoi obrabotki na iznosostoi-kost' instrumental'nykh stalei [Skilled assessment of influence of magnetic processing on wear resistance tool staly]. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2013, no. 3, pp. 55–60.
13. Lipatov A.A. Modelirovanie diffuzionnykh protsessov v kontakte tverdyi splav–stal' [Modeling of diffusive processes in contact solid alloy-steel]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii*. 2008, iss. 4, no. 9(47), pp. 22–26.
14. Bulychev V.V. Issledovanie protsessov skhvatyvaniia metallov pri trenii kak fazovogo perekhoda pervogo roda [Research of processes of a skhvatyvaniye of metals at friction as phase transition of the first sort]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2016, no. 11–4, pp. 9–14.
15. Lakhtin Iu.M. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov [Metallurgical science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgii, 1983, 359 p.
16. Bokshstein B.S. Diffuziia v metallakh [Diffusion in metals]. Moscow: Metallurgii, 1978, 248 p.
17. Zelinskii V.V., Stepanov Iu.S., Borisova E.A. Vliianie obrabotki magnitnym polem na iznos instrumental'nykh stalei [Processing influence by magnetic field on wear tool staly]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2017, no. 2 (322), pp. 73–81.

Получено 19.02.2018

Об авторах

Зелинский Виктор Васильевич (Муром, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: selvik46@yandex.ru.

Борисова Екатерина Александровна (Муром, Россия) – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: Catherine.b2011@yandex.ru.

Карпов Алексей Владимирович (Муром, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: krash45@mail.ru.

About the authors

Victor V. Zelinsky (Murom, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Machine Building, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs; e-mail: selvik46@yandex.ru.

Ekaterina A. Borisova (Murom, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Technology of Machine Building, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs; e-mail: Catherine.b2011@yandex.ru.

Alexei V. Karpov (Murom, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Machine Building, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs; e-mail: krash45@mail.ru.