

УДК 533.5, 669.01

ПРИЧИНЫ РАЗУПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е.А. Деулин¹, Е.И. Иконникова², Е.В. Ткачева¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: deulin@bmstu.ru; tkalena@yandex.ru

²Комбинат “Азовсталь”, г. Мариуполь, Украина
e-mail: ikonnikova46@mail.ru

Приведены результаты исследования структуры стальных образцов на микро- и наноуровнях, выполненного с использованием электронной микроскопии, вторичной ионной масс-спектрометрии, времяпролетной вторичной ионной масс-спектрометрии, позволяющие сделать выводы о характере и динамике процессов, вызывающих охрупчивание сталей в устройствах, при традиционном трении механизмов, резании металла, прокатке и в процессе контактного взаимодействия на наномасштабном уровне. Показано, как процессы формирования кристаллической и атомарной структур металла, связанные с диффузией атомов водорода, концентрирующихся около сульфидных включений, влияют на эксплуатационные свойства сталей. Так, в частности, полученные результаты подтверждают созданную теорию сухого трения, предполагающую генерацию атомов водорода и его изотопов в зонах контакта у поверхностей, с появлением их избыточной концентрации в материалах контактирующих пар, превышающей исходную в 100–300 раз.

Ключевые слова: сухое трение, сила трения, коэффициент покрытия, сорбция, десорбция, адгезия, когезия, вакуум, наншероховатость, вязкость, капиллярность, скорость скольжения, пятно контакта, водородная болезнь, наводороживание.

CERTAIN CAUSES OF WEAKENING OF DIFFERENT-PURPOSE STEELS

Е.А. Deulin¹, Е.И. Ikonnikova², Е.В. Tkacheva¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: deulin@bmstu.ru; tkalena@yandex.ru

²Azovstal Iron&Steel Works, Mariupol, Donetsk region, Ukraine
e-mail: ikonnikova46@mail.ru

Results of examination of steel specimen structures at the micro- and nanolevels are given. The examination was carried out using the electron microscopy, secondary ion mass-spectrometry, and time-of-flight secondary ion mass-spectrometry. The results allow the conclusions to be made on the nature and dynamics of processes causing the steel embrittlement in devices with the traditional friction of mechanisms, in metal cutting, rolling, and in the process of contact interaction at the nanoscale level. The influence of the processes of forming the crystal and atomic metal structures, which are connected with the diffusion of hydrogen atoms concentrating near sulfide inclusions, on the steel exploitation properties is shown. So, in particular, the obtained

results confirm the created theory of dry friction suggesting that the atoms of hydrogen and its isotopes are generated within contact areas near surfaces when their excess concentration appears in materials of contacting pairs, which is more than their initial concentration by a factor of 100–300.

Keywords: dry friction, friction force, coverage factor, sorption, desorption, adhesion, vacuum, nanoroughness, viscosity, capillarity, speed of slip, contact patch, hydrogen disease, hydrogen permeation.

Предпосылки исследования. Процессы, происходящие при так называемом сухом трении, представляют собой комплекс физико-химических процессов, природа которых разнообразна и вызывает дискуссии до сих пор. К таким явлениям относятся процесс принудительного растворения сорбированного газа, предсказанный в 1997 г. [1] и ряд других взаимодействий на электронно-ионном уровне, описанных разными авторами. Задачей настоящей публикации является оценка новых результатов, связанных с теорией наводороживания материалов пар трения, предполагающей генерацию водорода и его изотопов на поверхностях с последующим их растворением в материалах пар трения. Упомянутые теория и концепция предвосхитили результаты научной группы Деулина [2–6]. Считаем, что они могут быть интересны для специалистов-материаловедов по ряду причин:

1) в МГТУ им. Н.Э. Баумана, как и в большинстве технических вузов, нет установок вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и сотрудников, работающих на них;

2) многие специалисты-материаловеды не знают возможностей метода, так как в РФ нет учебной литературы на русском языке;

3) сообщение И.С. Бредихина (сотрудника Techno Info Ltd. TOF SIMS), приглашенного Деулиным в 2010 г., показало “разноязычность” сотрудников МГТУ и физиков-прикладников, создателей исследовательского оборудования XXI в., — слишком дорогого для университета (стоимость установки для времявторичной ионной масс-спектрометрии (TOF SIMS) составляет 1 млн Евро, стоимость CAMECA4 — 2,5 млн USD);

4) задача публикации результатов первых экспериментов состояла в том, чтобы экспериментально продемонстрировать прямые и косвенные доказательства образования водорода и его изотопов в процессе трения сухих поверхностей;

5) по мнению авторов, наилучшим методом обнаружения появляющихся атомов водорода и его изотопов является метод ВИМС анализа, позволяющий качественно и количественно (при соответствующей калибровке) определять характер распределения атомов водорода и его изотопов, растворенных в материалах пары трения, с точностью до 0,0001 %, т.е. получать результаты, не сопоставимые с методами, используемыми в традиционном материаловедении.

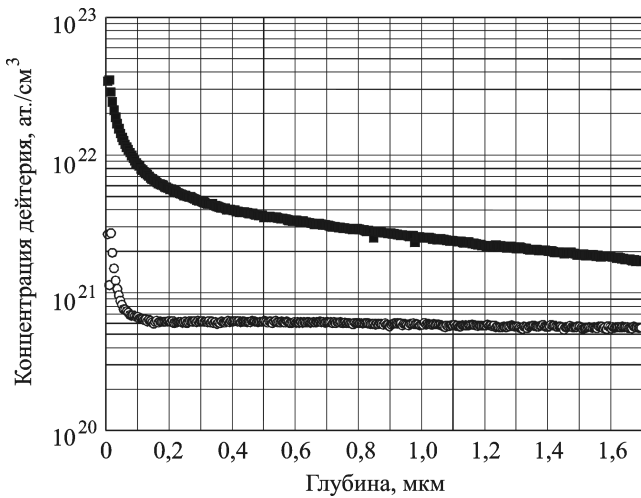


Рис. 1. Распределение водорода по глубине в неподвижном кольце и шарике ($N = 24000$ циклов) шарикоподшипника после испытаний в атмосфере

Результат одного из первых экспериментов [7], показавших высокую концентрацию водорода, проникающего в материал трения из атмосферы, где, как известно, парциальное давление водорода составляет лишь $p_{H_2} = 4 \cdot 10^{-3}$ тор, приведен на рис. 1.

В экспериментах выявлено, что концентрация растворенного водорода на глубине до 0,1 мкм образца шарикоподшипника на один-два порядка превышает концентрацию, которая, согласно закону Сиверта [8], должна появиться на этих глубинах при обычных расчетах. Традиционное для сталей значение концентрации водорода $C_{H_2} = 1 \cdot 10^{21} \dots 2 \cdot 10^{21}$ ат./см³, хорошо видимое на кривой 2 (см. рис. 1) у поверхности трения резко возрастает до слишком больших (для традиционных представлений) значений $C_{H_2} = 4 \cdot 10^{22}$ ат./см³, что, согласно разработанной исполнителями теории [1, 7, 9], хорошо согласуется с упомянутым законом [8], поскольку концентрация атомов водорода на поверхностях трения исследованного шарикоподшипника согласно теории “сухого трения” составляет $C_{H_2} = (1 \dots 9) \cdot 10^{23}$ ат./см³, т.е. значение, которое соответствует коэффициенту покрытия поверхности сорбатом (сорбированным водородом) при сухом трении, но на много порядков превышает значения этого коэффициента, полученного путем традиционно выполненных расчетов для значения давления водорода $p_{H_2} = 4 \cdot 10^{-3}$ тор, использованного в эксперименте.

Первые результаты. Второй эксперимента [3], проводимый в вакууме, где парциальное давление дейтерия составляло $p_{D_2} = 1 \cdot 10^{-1}$ тор, представлен на рис. 2. Из рис. 2, как и рис. 1, следует, что увеличивается концентрация дейтерия, растворяемого в процессе трения. При этом число молекул дейтерия, растворенных в материале элементов шарикоподшипника при трении в атмосфере дейтерия,

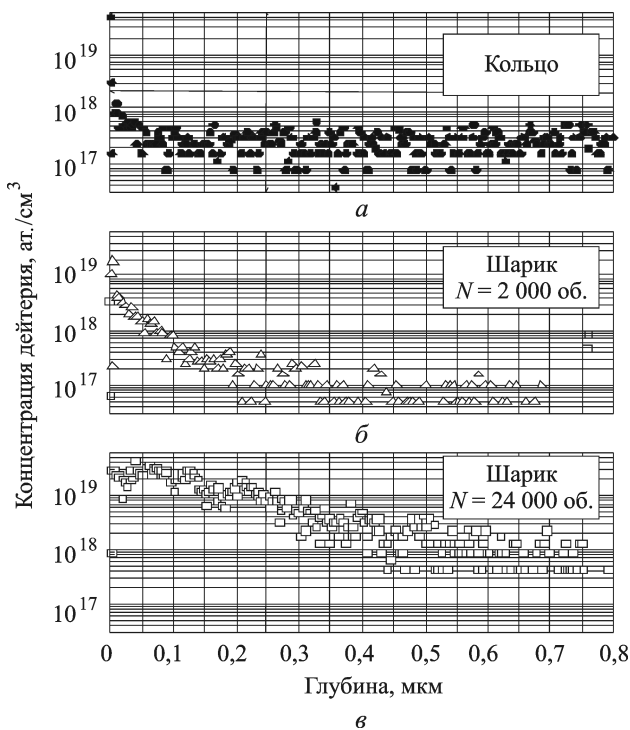


Рис. 2. Распределение дейтерия (а), не участвовавшего в процессе трения, по глубине в неподвижном кольце в рабочем шарике после 2000 циклов (б) и 24000 циклов (в)

превышает число молекул дейтерия, находившихся в вакуумной камере, что, на первый взгляд, противоречит как упомянутому закону растворения [8], так и законам сохранения массы и энергии.

Следующим экспериментом, также показавшим большое увеличение концентрации водорода, растворяемого в процессе трения, было исследование взаимодействия молекул газа и пылинок, движущихся в потоке газа, со стенкой металла трубы магистрального газопровода [3], химический состав которой указан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали магистральных газопроводов

Марка стали	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Nb	V	S	P	Mo
10Г2ФБ	0,09–0,12	1,55–1,75	0,15–0,35	0,02–0,04	0,09–0,12	<0,006	<0,020	–

Авторы считают, что физическая картина этого взаимодействия на наномасштабном уровне аналогична процессам традиционного трения и также сопровождается растворением сорбированных на внутренней поверхности трубы газов (водорода и дейтерия) в металле трубы, т.е.

происходит по той же физической схеме [1], которая имеет место при обычном сухом трении металлических поверхностей.

Процесс контакта пылинок газа с трубой происходит на микроуровне, а процессы сорбции, диссоциации молекул газов на атомы на поверхностях происходят на наноуровне и поэтому кажутся незначительными. Следуя основам физики [10], мы должны помнить, что процесс диффузии атомов протекает медленно, так как зависит от скорости и коэффициента диффузии D . Уравнение нестационарной диффузии позволяет нам рассчитывать значение концентрации водорода C на глубине x по истечении времени t :

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (1)$$

где x — среднеквадратическое расстояние от поверхности до места, где определяется концентрация молекул, м; t — время проникания молекулы водорода (изотопов водорода) от поверхности на глубину x , с; C_0 — концентрация атомов изотопов водорода у поверхности (в первом монослое сорбата), ат./см³; D — коэффициент диффузии водорода (или его изотопа) в материале; erf — функция ошибок Гаусса.

При этом на поверхностях трения, как указано в работе [1], сохраняется постоянная (возобновляемая) концентрация C_0 , не зависящая от времени: $C(0, t) = C_0$. В обычных атмосферных условиях металлургам и технологам, имеющим дело с большими значениями температур, давлений, концентрацией присадок, концентрация по атмосферному водороду C_{0H} (напомним, что парциальное давление атмосферного водорода в 8 раз меньше, чем для атмосферного гелия), кажется несущественной, но, согласно излагаемой концепции, результатам физических расчетов и экспериментальным данным, это глубокое заблуждение ортодоксальных практиков, так как это значение для первого монослоя сорбата (изотопов водорода) составляет $C_{0H} = 10^{23} \dots 10^{24}$ ат./см³ (при концентрации водорода в толще металла исследованных образцов $C_H = 10^{17} \dots 10^{19}$ ат./см³) т.е. на 4–7 порядков (!) больше, чем в толще металла. Напомним, что расчетная толщина этого слоя (первого монослоя, что существенно!) составляет $3 \cdot 10^{-7}$ мкм, что большинству практиков кажется не играющим существенной роли.

Для развития полученных результатов [4] была выполнена экспериментальная проверка [5] высказанной гипотезы на примере магистральных трубопроводов. Для этого из околосварной зоны трубы был вырезан образец по схеме, приведенной на рис. 3. Марка стали образца и ее состав приведены в табл. 1.

Задача проверки предлагаемой гипотезы на примере трения микро-размерных пылинок (содержащихся в потоке газа) со стенкой трубы

состояла в том, чтобы экспериментально получить результаты этого процесса не только на уровне 1–2 мкм, как это было показано на рис. 1 и 2, но и по всей толщине трубы магистрального газопровода, т.е. на глубине до 30 мм. Поскольку методы ВИМС анализа не позволяют исследовать глубины более 5...10 мкм (что требует от четырех до двадцати часов непрерывной работы), то разделка образца трубопровода (см. рис. 3), выполнялась на фрезерном станке. Результаты ВИМС анализа для набора образцов представлены на рис. 4.

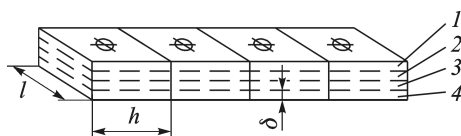


Рис. 3. Схема разделки исходного образца на доли (направления вертикальной резки показаны тонкими линиями). Размеры окончательного образца:

$l = 24$ мм, ширина $h = 10$ мм, толщина $\delta = 3$ мм

Правые части кривых распределения (см. рис. 4) соответствуют концентрации водорода, успевшего диффундировать сквозь металл трубопровода на глубину $x = 0,005 \dots 25$ мм (т.е. почти на всю толщину трубы) в результате длительного (5–30 лет) трения газа о стенку трубы. Левые части тех же кривых соответствуют вторичному распределению концентраций водорода и являются результатом резания материала трубы на образцы, т.е. левая часть графиков — это результат быстрого “наслоения” ускоренной диффузии водорода при резании трубы на медленную диффузию водорода в металл образцов на глубинах $x = 0 \dots 2$ мкм.

На рис. 5 приведена полученная Е.В. Ткачевой зависимость расчетного распределения концентрации водорода $C_H(x)$, растворенного в стенке металла трубы по глубине x после 20 лет эксплуатации. Точки (треугольники) на диаграмме соответствуют результатам

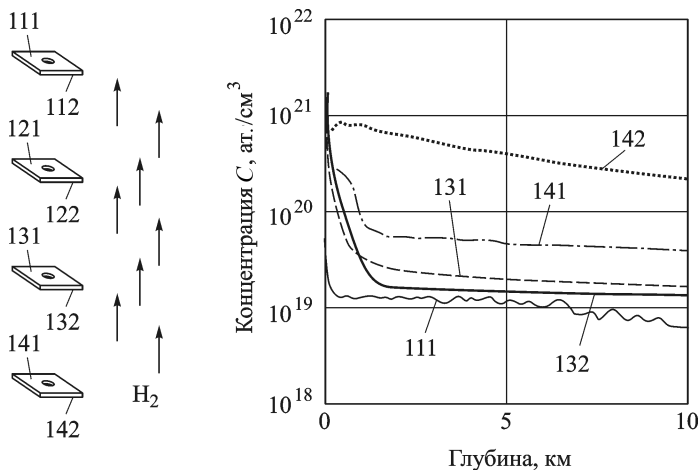


Рис. 4. Результаты ВИМС анализа образцов, вырезанных из трубопровода в соответствии с рис. 3

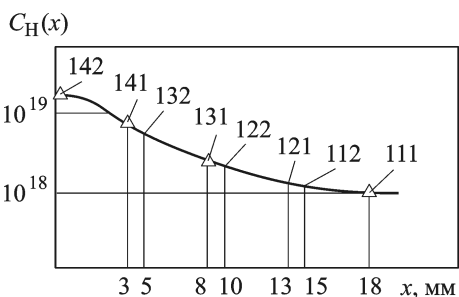


Рис. 5. Диаграмма расчетного распределения концентрации водорода $C_H(x)$, по глубине x после 20 лет эксплуатации. Цифрами (относительной индексации) показано расположение поверхностей образцов в соответствии со схемой рис. 3

атомов водорода и его изотопов, в частности трития, в материалах пары трения на примере резания металла (как яркой разновидности процесса трения).

В описываемом эксперименте [5], проведенном в 2008 г. на кафедре резания (МТ-2) МГТУ им. Н.Э. Баумана для оценки физических особенностей сухого трения выполнялись измерения уровней рентгеновского и гамма-излучений при резании, которые сопоставлялись с фоновыми значениями. Оборудование эксперимента: токарный станок, резец с пластиной T15K6, радиометр-дозиметр МКС-01Р.

Параметры эксперимента: скорость резания $v = 72,2$ м/мин, подача $s_0 = 0,2$ мм/об, частота вращения шпинделя $N = 315$ мин⁻¹, глубина резания $t = 1$ мм, материал заготовки: сталь 40.

Как следует из табл. 2, экстремальный процесс сухого трения (процесс резания) характеризуется повышением в 1,1–1,9 раз фонового гамма-излучения, и тот же процесс характеризуется повышением в 1,2 раза фонового рентгеновского излучения.

Таблица 2

Показания измерительных приборов при эксперименте

Вид излучения	Уровень излучения, мк ³ /ч,			
	фоновый	при резании		
Гамма	0,10	0,19	0,11	0,16
Рентгеновское	0,11	0,13		

Полученные результаты позволяют рассчитать число молекул трития и концентрацию этих молекул, образовавшихся в материале пары трения, т.е. в материале резца и снятой резцом стружки. Авторы

правых частей диаграмм (см. рис. 4) концентрации водорода, успешного диффундировать в результате трения газа о стенку трубы на глубину $x = 0,005 \dots 20$ мм за период эксплуатации, и показывают хорошее совпадение теоретических и расчетных результатов.

Некоторые результаты, противоречащие традиционной физике. Идея четвертого эксперимента состояла в том, чтобы экспериментально получить не только косвенные, но и прямые доказательства образования новых ато-

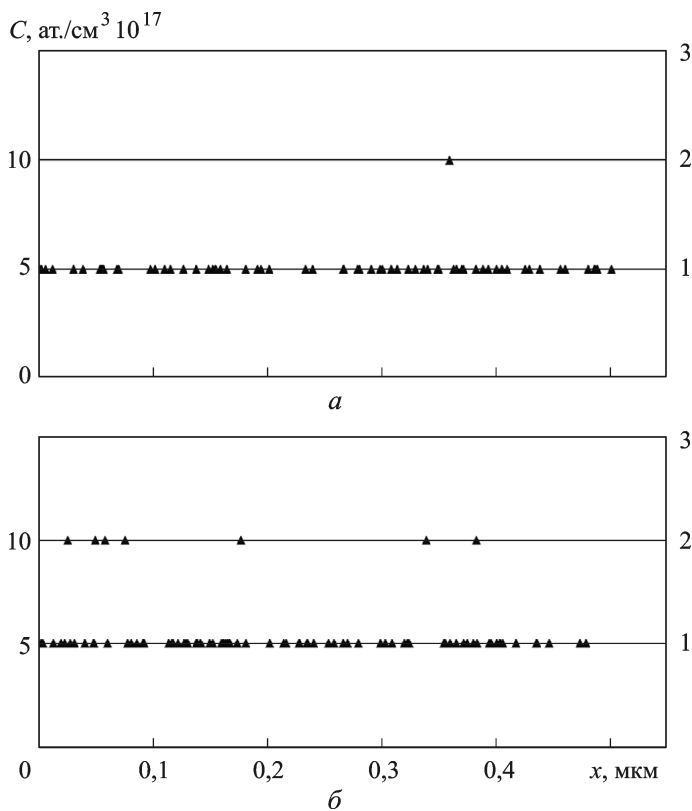


Рис. 6. Зависимость концентрации атомов трития от глубины травления на базовой (а) и рабочей (б) поверхностях реза

предпочли экспериментально определить это число. Анализ был выполнен на установке TOF SIMS-5. На рис. 6 представлены графики зависимости числа атомов трития ($C_{T_2} = 1 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^3$) от глубины травления на базовой поверхности реза, не участвующей в резании (а) и на рабочей поверхности реза (б), которые показывают, что концентрация атомов трития в зоне трения возросла на 50–80% по сравнению с фоновой концентрацией. Полученные результаты косвенно подтверждают положения создаваемой концепции. Описанные результаты наводораживания стальных образцов при таких “слабых” процессах, как трение в вакууме или даже резание стальных заготовок, металлургам [10, 11] могут показаться малозначимыми по интенсивности своего влияния при сравнении с такими масштабными процессами металлообработки, как плавка, разливка стали, прокатка слэбов и стального листа из них.

Исследование процесса листопрокатки. Исследования процесса листопрокатки на металлургическом комбинате “Азовсталь”, выполненные Е.И. Иконниковой [12, 13], показали, что факторами, определяющими склонность к образованию расслоения, являются гомогенность структуры и степень чистоты по неметаллическим включениям,

а наибольшее влияние на образование дефектов оказывают форма и твердость плоских остроугольных включений, являющихся концентраторами высоких внутренних напряжений

Известно, что специфические условия кристаллизации непрерывно литой стали определяют осевую химическую неоднородность, наследуемую листом и влияющую на образование микротрещин через число, тип, морфологию и распределение структурных составляющих дефектов, видимых с помощью электронного микроскопа. Согласно классическим представлениям [10, 11], исключением является водород, который диффундирует к структурным областям с повышенными внутренними напряжениями. Считается, что на внутренних граничных поверхностях сульфидных включений атомы водорода рекомбинируют в газ, создавая высокое давление, способное вызвать растрескивание даже при отсутствии внешних нагрузок. Увеличение дисперсности и однородности структурных составляющих повышает сопротивление охрупчиванию за счет большей равномерности пластической деформации и более равномерного распределения водорода по всему объему металла. Кроме того, с повышением температуры сульфидные включения способны растворяться и поэтому меняют свою морфологию [12].

Пятый эксперимент [13] проводился в рамках одной плавки кислородно-конвертерного цеха “Азовсталь” и состоял в том, что первая часть слябов, прокатанных на стане 3000 ОАО “ММК имени Ильича” предварительно нагревалась. Для определения влияния температур нагрева на морфологию сульфидных включений и на качество получаемого листа образцы, прогретые до 1100 и 1250 °С и вырезанные из осевой зоны дефектных листов, охлаждались на воздухе.

Для получения данных о трансформации неметаллических включений в процессе прокатного передела (листов непрерывнолитой стали 09Г2С) одновременно с исследованием на просвечивающем электронном микроскопе УМВ-100К влияния несплошностей на образование микротрещин был проведен ультразвуковой и металлографический контроль. Химический состав исследованной стали приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав стали прокатываемого листа

Марка стали	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Nb	V	S	P	Mo
09Г2С	0,12	1,30–1,70	0,50–0,80	0,015–0,045	0,09–0,12	<0,04	< 0,035	–

Из представленных на рис. 7 картин структуры следует, что изменение формы включений от пластинчатой к глобулярной приводит к



Рис. 7. Лист (Азовсталь), сталь 10Г2ФБ (3200) до (а) и после (б) нагрева ($\times 4000$)

изменению характера разрушения образцов (полученных путем расщепления образцов с использованием угольных реплик). На этих рисунках, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, можно увидеть различия в морфологии сульфидных включений. Так, в исходном образце (рис. 7, а), вырезанном из осевой зоны дефектного листа, сульфидные включения имеют пластинчатую форму, вызывающую хрупкое разрушение. После нагрева эти пластины утончаются.

Известно [10], что сульфиды являются косвенной причиной водородного “заболевания” и растрескивания металла листа. В работе [13] показано, что процесс диффузии атомов водорода от их скоплений (являющихся ограниченным источником диффузии), ведущий к уменьшению градиента концентрации водорода у микрограниц сульфидных включений, не всегда успевает реализоваться полностью, так как это зависит от тепловых режимов прокатки листа на стане.

В результате эксперимента выявлено, что нагрев до $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к образованию сульфидов глобулярной формы (рис. 7, б), что вызвано увеличением скорости диффузии молекул веществ, растворенных в обрабатываемом металле, и его упрочнением, особенно если принимать во внимание уменьшение градиента концентрации молекул растворенного водорода и исчезновение водородных пазух в зонах пластинчатых включений, являющихся причиной “водородной болезни” и стресс-коррозии.

Проведенный ультразвуковой и металлографический контроль листов выявил в первом образце большое число микротрещин, классифицируемых как микротрещины напряжений (возникающие у пластин), стимулированных скоплением атомов водорода.

Описанный процесс диффузии атомов из ограниченных источников водорода, которыми (см. рис. 7, а) являются сульфидные включения, в результате прогрева листа и диффузии водорода из источников

обеспечивает выравнивание концентрации C_{0H} , т.е. упрочнение металла, видимое в микроскоп как образование сульфидов глобулярной формы (см. рис. 7, б).

Задача шестого эксперимента состояла в том, чтобы на наноуровне продемонстрировать процесс диффузии атомов из ограниченных источников водорода на примере дейтерия. Эксперимент, проведенный канд. техн. наук В.В. Коноваловым [14], показал, что “ограниченным” источником дейтерия являлся его первый монослой (точнее 0,35 монослоя) сорбированных на поверхности атомов дейтерия.

Эксперимент показал также резкое снижение (на 1–1,5 порядка) концентрации атомов дейтерия в объеме образца по сравнению с концентрацией атомов у “источника” (в монослое на поверхности). Результаты эксперимента, приведенные на рис. 8, показывают, что в зоне у поверхности образца (в случае прокатки, в зоне сульфидного включения), являющейся ограниченным источником атомов дейтерия, атомы дейтерия,двигающиеся от поверхности (слева) в толщу металла, перераспределяются в этой толще со снижением концентрации до уровня $C_{0H} = 10^{18}$.

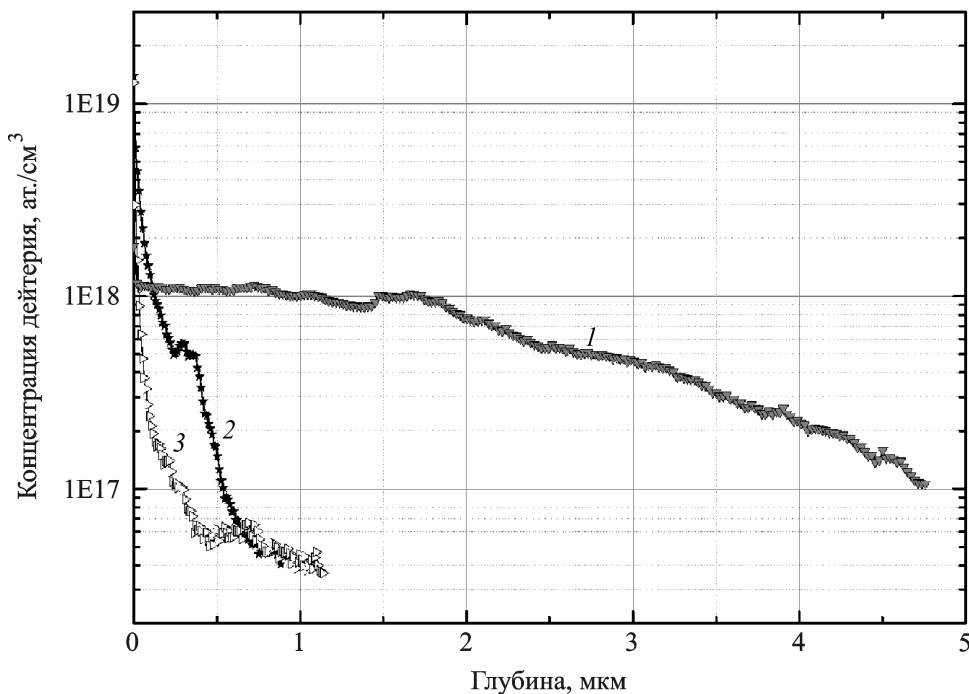


Рис. 8. Распределение концентрации атомов дейтерия по глубине на примере образца, покрытого монослоем дейтерия после фрикционного воздействия в течение 30 с:

кривая 1 — распределение концентрации в зоне воздействия; 2 — распределение концентрации у границы зоны трения; 3 — исходное распределение концентрации в зоне, не подвергнутой воздействию

Подобное снижение исходной концентрации $C_{0H} = 10^{22}$ (кривая $d1$ в нулевой области, слева) после теплового воздействия до уровня $C_{0H} = 10^{18}$ и меньше характеризует упрочнение металла и совпадает с заключением и выводами работ [12, 13].

Одной из задач данной публикации являлось доказательство того, что даже пяти-десятиминутный процесс трения (при прокатке листа) является причиной наводороживания и охрупчивания материалов пары трения, т.е. инициирует начало разрушения листа и валков прокатных станов. Отсутствие значимых для металлургов источников водорода, как и высокие температуры в этом процессе, — все это не является убедительным аргументом для опровержения излагаемой концепции, так как валки постоянно охлаждаются водой, а для процесса наводороживания достаточно наличие одного (!) монослоя водорода, образованного на нагретых поверхностях валков и листов из диссоциировавших молекул воды (даже при температурах выше критической!).

Для определения коэффициента заполнения поверхностей пар трения атомами водорода в первом мономолекулярном слое предлагаем воспользоваться уравнением, полученным [7, 9, 15] специально для пар трения:

$$\Theta \leq \frac{pd_0\alpha}{4\sqrt{\frac{2mkT_a}{\pi}}} \left(\frac{L}{v} - \tau_0 e^{\frac{E_a}{RT_f}} \right), \quad (2)$$

где v — скорость скольжения (валка по листу); L — среднее расстояние между вершинами микронеровностей; τ_0 — постоянная времени, связанная с периодом колебаний атомов на поверхности, с; E_a — энергия десорбции, Дж/м²; T_f — максимальная температура (“вспышки”) поверхности, вышедшей из контакта, К; T_a — средняя температура перед новым контактированием на наноуровне, К; α — коэффициент прилипания; k — постоянная Больцмана; d_0 — диаметр молекулы сорбата; m — масса молекулы сорбата (водорода), кг; R — универсальная газовая постоянная.

По представленным в работе [14] экспериментально полученным результатам это значение коэффициента заполнения составляет 0,35, т.е. около одной трети сплошного монослоя, состоящего из молекул водорода (в работе приведены данные по дейтерию) и покрывающего поверхности, участвующие в трении. Объемная концентрация этих молекул водорода (или его изотопов) на поверхностях составляет $C_{0H} = 10^{23}$ ат./см³. Вспомним, что обычная концентрация атомов водорода в толще металла валков или прокатываемых листов имеет значение $C_H = 10^{17} \dots 10^{19}$ ат./см³, т.е. на 5–8 порядков меньше. Из

этого соотношения следует, что атомы водорода интенсивно диффундирующие в толщу металла листа (валков), накапливаясь в приповерхностной зоне, стимулируют начало ее “водородного заболевания” и разрушения у поверхностей в зоне их контактного взаимодействия.

Так, результаты простых физических расчетов, выполненные по формуле (1) показывают, что после пяти-десятиминутного процесса прокатки (длительности процесса диффузии атомов водорода) при разных температурах цифры распределения концентрации атомов водорода по глубине дают увеличение в 200–300 раз исходных значений концентрации водорода и этот процесс является причиной приповерхностного растрескивания как валков, так и обрабатываемого листа на глубинах до 3,5 мм. Расчеты показывают, что глубина проникания атомов существенно зависит от коэффициента диффузии, в свою очередь экспоненциально зависящего от температуры металла, а следовательно, и от режима термообработки при прокатке листа.

Из простейших расчетов следует, что повышение от 900 до 1250 °С температуры при прокатке и от 1 до 5 мин времени прокатки увеличивают глубину наводороживания толщи металла (т.е. зону будущего хрупкого разрушения) на 0,1... 3,5 мм.

Выводы. Авторы надеются, что представленные результаты позволяют сделать интересные для специалистов-материаловедов выводы об использовании процессов, вызывающих наводороживание и охрупчивание сталей в различных процессах трения таких, как резание металла, прокатка и другие процессы контактного взаимодействия, включая процессы на наноуровне. Показано также, как процессы формирования структуры металла, зависящие от концентрации включений и температур, связанные с процессом диффузии атомов (в первую очередь водорода), влияют на эксплуатационные свойства сталей в соответствии с разработанной концепцией. Полученные результаты подтверждают создаваемую теорию сухого трения, предполагающую генерацию атомов водорода и его изотопов в зонах контакта и появление их избыточной концентрации в материалах контактирующих пар, превышающей исходную в сотни раз. Авторы убеждены, что полученные результаты можно будет использовать в ближайшем будущем для создания методов экологической защиты и диагностики магистральных газопроводов [16]; методов предотвращения техногенных катастроф [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Deulin E.A.* Exchange of gases at friction in vacuum // ECASIA'97. John Wiley & sons, Nov. 1997. P. 1170–1175.

2. *Deulin E.A., Goncharov S.A., de Segovia J.L. and Nevshoupa R.A.* Mechanically stimulated solution of adsorbed hydrogen and deuterium in steel // *Surface and Interface Analysis*, 2000. 30. P. 635–637.
3. *Deulin E.A., Nevshoupa R.A.* Deuterium penetration into the bulk of a steel ball of a ball bearing due to its rotation in vacuum. – *Applied Surface Science*, 144–145, (1999). P. 268.
4. *Deulin E.A., Filippova N.V., Papko V.M., Ryabov N.V., Papko V.M., Tkacheva E.V.* Effect of gas adsorption on tribology of ball bearings in vacuum / *Automotive and Industrial Lubrication: Techniche Academie Esslingen Hrsg: Wilfried J. Bartz,- Ostfildern: TAE, Book of Syn.* 2006. P. 231.
5. *Деулин Е.А., Машуров С.С., Мирзоев А.М., Ткачева Е.В.* Исследование причин появления “водородной болезни” в материале труб магистральных газопроводов и разработка вакуумных методов их устранения // *Конверсия в машиностроении*. 2007. Т. 3 (82). С. 32–36.
6. *Деулин Е.А., Петросян Г.А., Бредихин И.С.* Результаты исследования процесса растворения изотопов водорода в материалах пар трения // *Вакуумная техника и технология*. 2003. Т. 20. № 2. С. 81–84.
7. *Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms* / E.A. Deulin, V.P. Michailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa. Springer edition, 2012, 234 p.
8. *Sieverts A., Zapf G., Moritz H.* // *Zs. phys. Chem.*, 1938/1939. A183, 19. P. 32–36; p. 268.
9. *Деулин Е.А.* Единство нанофизики трения для различных технологий машиностроения / *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 9–10. С. 28–36.
10. *Геллер Ю.А., Рахматдт А.Г.* Материаловедение. М.: Металлургия. 1975.
11. *Морозов Н.А.* Водород и азот в стали. М: Металлургия, 1968.
12. *Туяхов В.Н., Мышкин К.В., Сергейко Л.Г., Бурова Е.И.* Дислокационная структура дроссированной стали 08кп после естественного и искусственного деформационного старения / *Термическая обработка металлов // Тематический отраслевой сборник № 5.* М.: Металлургия, 1977. С. 19–120.
13. *Соколов К.Н., Туяхов В.Н., Леонтьев В.А., Бурова Е.И.* Влияние степени обжатия на механизм рекристаллизации холоднокатаной листовой стали 08кп. / *Листопрокатное производство // Тематический отраслевой сборник. № 3.* М.: Металлургия, 1974. С. 50–56.
14. *Деулин Е.А., Коновалов В.В., Пустовойт Ю.М., Сергеев Д.В., Трифонов А.Ю.* Механически-стимулированные процессы диссоциации сорбированной тяжелой воды (D₂O) и растворения дейтерия в нержавеющей стали // *Вакуумная техника и технология*. 2003. Т. 13. № 3. С. 17–22.
15. *Deulin E.A., Ikonnikova E.I.* Process of hydrogen dissolution into surfaces the gas pipe line tubes as a result of nanoscale friction process // *SIMS Europe 2010/ 7th European Workshop on Secondary Ion Mass Spectrometry.* Muenster Germany Sept, 2010. P. 110.
16. *Патент РФ. № 2391601* Способ определения остаточного ресурса металла магистрального газопровода от 21.07.2008.
17. *Отчет о выполнении третьего этапа Гос. контракта № П2421 от 19.09.1009 по проекту “Создание новых методов и приборов, основанных на наномеханике и физике сухого трения для предотвращения технологических катастроф в электронике, газотранспортных системах, ядерной технике”. Программа “Научные и научно-педагогические кадры России” на 2009–2013 гг. Мероприятие № 1.2.1. Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук. М., МГТУ. 2011.*

REFERENCES

1. *Deulin E.A.* Exchange of gases at friction in vacuum. ECASIA '97. John Wiley & Sons, 1997, no. 11, pp. 1170–1175.
2. *Deulin E.A., Goncharov S.A., Segovia J.L., Nevshoupa R.A.* Mechanically stimulated solution of adsorbed hydrogen and deuterium in steel. *Surf. Interface Anal.*, 2000, no. 30, pp. 635–637.
3. *Deulin E.A., Nevshupa R.A.* Deuterium penetration into the bulk of a steel ball of a ball bearing due to its rotation in vacuum. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, vol. 144–145, pp. 283–286.
4. *Deulin E.A., Filippova N.V., Papko V.M., Ryabov N.V., Papko V.M., Tkacheva E.V.* Effect of gas adsorption on tribology of ball bearings in vacuum. Automotive and industrial lubrication. Technische Akademie Esslingen Hrsg, Wilfried J. Bartz, Ostfildern, TAE Publ., 2006. 231 p.
5. *Deulin E.A., Mashurov S.S., Mirzoev A.M., Tkacheva E.V.* The investigation of causes for “hydrogen disease” in a gas pipeline material and the development of vacuum methods to eliminate them. *Konvers. Mashinost.* [Convers. Mech. Build.], 2007, vol. 3, pp. 32–36 (in Russ.).
6. *Deulin E.A., Petrosyan G.A., Bredikhin I.S.* Rezul'taty issledovaniya protsessa rastvoreniya izotopov vodoroda v materialakh par treniya. *Vak. Tekh. Tekhnol.* [Vac. Eng. Technol.], 2010, vol. 20, no. 2, pp. 81–84 (in Russ.).
7. *Deulin E.A., Michailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A.* Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms. Springer, 2012, 234 p.
8. *Sieverts A., Zapf G., Moritz H.* Solubility of hydrogen, deuterium, and nitrogen in iron. *Z. Physik. Chem.*, 1938, vol. A183, pp. 19–37 (in German).
9. *Deulin E.A.* The unity of friction nanophysics for various engineering technologies. *Trenie Smazka Mash. Mekh.* [Frict. Lubr. Mach. Mech.], nos. 9–10, 2010, pp. 28–36 (in Russ.).
10. *Geller Yu.A., Rakhshadt A.G.* Materialovedenie [Materials Science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975.
11. *Morozov N.A.* Vodorod i azot v stali [Hydrogen and nitrogen in steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968.
12. *Tuyakhov V.N., Myshkin K.V., Sergeyko L.G., Burova E.I.* The dislocation structure of 08KP trained steel after natural and artificial strain aging. *Term. Obrab. Met. – Temat. Otrasl. Sb.* [Heat Treat. Met. – Spec. Top. Collect.], 1977, no. 5, pp. 19–120 (in Russ.).
13. *Sokolov K.N., Tuyakhov V.N., Leont'ev V.A., Burova E.I.* The influence of the compression degree on the recrystallization mechanism of 08KP cold-rolled sheet steel. *Listoprokatnoe Proizvod. – Temat. Otrasl. Sb.* [Sheet Rolling Prod. – Spec. Top. Collect.], 1974, no. 3, pp. 50–56 (in Russ.).
14. *Deulin E.A., Konovalov V.V., Pustovoyt Yu.M., Sergeev D.V., Trifonov A.Yu.* Mechanically-stimulated dissociation of adsorbed heavy water (D₂O) and dissolution of deuterium in stainless steel. *Vak. Tekh. Tekhnol.* [Vac. Eng. Technol.], 2003, vol. 13, no. 3, pp. 17–22 (in Russ.).
15. *Deulin E.A., Ikonnikova E.I.* Process of hydrogen dissolution into the surfaces of gas pipe line tubes as a result of nanoscale friction. *7th Eur. Workshop Second. Ion Mass Spectrom.*, SIMS Europe 2010, Muenster, p. 110.
16. *The method for determining the remaining life of main gas pipeline metal.* Patent RF, no. 2391601, 2008.

17. *Otchet* o vypolnenii 3 etapa Gos. Kontrakta No. P2421 ot 19.09.2009 po proektu “Sozdanie novykh metodov i priborov osnovannykh na nanomekhanike i fizike sukhogo treniya dlya predotvrashcheniya tekhnologicheskikh katastrof v elektronike, gazotransportnykh sistemakh, yadernoy tekhnike”. Programma “Nauchnye i nauchno pedagogicheskie kadry Rossii” na 2009-2013 gg. Meropriyatie No. 1.2.1. Provedenie nauchnykh issledovaniy nauchnymi gruppami pod rukovodstvom doktorov nauk [The report on completion of the third phase of State Contract no. P2421 dated 19.09.2009, project “The development of new methods and devices based on nanomechanics and physics of dry friction to prevent technological disasters in electronics, gas transportation systems, and nuclear technology”. Program “Scientific and pedagogical staff of Russia” in 2009–2013. Activity no. 1.2.1. Scientific research conducted by science teams under the guidance of doctors of sciences]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2011.

Статья поступила в редакцию 05.04.11

Евгений Алексеевич Деулин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 500 научных работ и 50 патентов в области электронных технологий в машиностроении. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.A. Deulin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Electronic Technologies in Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 500 publications and 50 patents in the field of electronic technologies in mechanical engineering.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Екатерина Ивановна Иконникова (Бурова) — инженер-исследователь центральной заводской лаборатории, комбината “Азовсталь” (г. Мариуполь, Украина). Автор ряда научных работ в области микроструктурного анализа металлов.

Комбинат “Азовсталь”, Донецкая обл., г. Мариуполь, ул. Лепорского, 1, 87500 Украина.

E.I. Ikonnikova (Burova) — engineer-researcher of the central laboratory of the Azov Iron & Steel Works (town of Mariupol, Ukraine). Author of a number of publications in the field of microstructural analysis of metals.

Azov Iron & Steel Works, Leporskogo ul., 1, Mariupol, Donetsk region, 87500 Ukraine.

Елена Викторовна Ткачева — стажер-исследователь кафедры “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти статей в области исследования трения в вакууме.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.V. Tkacheva — probationer-researcher of “Electronic Technologies in Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of five publications in the field of studying friction in vacuum.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.