

PACSnumbers: 62.20.mm, 62.20.mt, 62.20.Qp, 81.20.Wk, 81.40.Np, 81.40.Pq, 82.33.Xj

Обоснование механоплазменного эффекта, возникающего в процессе механической обработки металла в смазочно-охлаждающих технологических средствах

А. И. Сошко, В. А. Сошко

*Херсонский национальный технический университет,
Бериславское шоссе, 24,
73008 Херсон, Украина*

Предложена модель превращения в зоне резания поверхностно-активного смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) в радикально-активную водородную плазму. Такое явление особенно ярко выражено, когда в состав СОТС добавляется высокомолекулярное соединение определённого химического состава и концентрации. Поскольку цепь пиролических превращений полимерной присадки к СОТС приводит к появлению водорода и углерода в атомарной и других активных формах, была выдвинута гипотеза об активном участии протонов в механохимическом процессе при металлообработке и одновременной перманентной карбонизации режущих кромок инструмента. Совокупность экспериментальных данных показывает, что различные контактные взаимодействия материала и среды, а также физико-химические процессы, происходящие в результате разрушения металла, связаны, в первую очередь, с электрически активной реальной структурой материала, возникающей вследствие механического воздействия. Показана решающая роль образования и роста трещины как фактора, инициирующего и ускоряющего различные физико-химические процессы и явления, протекающие в щели между клином инструмента и вершиной трещины, приводящие к образованию водородной плазмы. На основании обобщения исследований, посвя-

Corresponding author: Viktor Oleksandrovysh Soshko
E-mail: a.soshko@gmail.com

*Kherson National Technical University,
24 Beryslav Highway, 73008 Kherson, Ukraine*

Please cite this article as: O. I. Soshko and V. O. Soshko, Justification of Mechanoplasmonic Effect Arising During a Process of Mechanical Treatment of Metal in Lubricant-Cooling Agents, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 1: 117–140 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.01.0117.

щённых различным физико-химическим явлениям, возникающим в момент разрушения твёрдого тела, сделана попытка рассмотреть снижение энергозатрат на процесс резания металла в СОТС как результат совокупного механического и теплового воздействия. Дополнительным источником тепловыделения является рекомбинация иона водорода в ультрамикроскопических областях непосредственно в зоне преодоления сцепления между атомами обрабатываемого металла. Предложенный способ механоплазменной обработки металла не только имеет высокую эффективность, но и позволяет изготавливать изделия, обладающие повышенной эксплуатационной долговечностью.

Ключевые слова: деформация, разрушение, трещина, активация, водород, протон, радикалы, ионизация, плазма, диффузия.

Запропоновано модель перетворення у зоні різання поверхнево-активного мастильно-охолодного технологічного засобу (МОТЗ) в радикально-активну водневу плазму. Таке явище є особливо яскраво вираженим, коли до складу МОТЗ додається високомолекулярна сполука певного хемічного складу та концентрації. Оскільки ланцюг піролітичних перетворень полімерної присадки до МОТЗ приводить до появи водню та вуглецю в атомарній та інших активних формах, було висунуто гіпотезу про активну участь протонів у механохемічному процесі при металообробленні й одночасну перманентну карбонізацію різальних пругів інструменту. Сукупність експериментальних даних показує, що різні контактні взаємодії матеріялу із середовищем, а також фізико-хемічні процеси, що відбуваються в результаті руйнування металу, пов'язані, в першу чергу, з електрично активною реальною структурою матеріялу, що виникає внаслідок механічного впливу. Показано вирішальну роль утворення та зростання тріщини як чинника, що ініціює та пришвидшує різні фізико-хемічні процеси і явища, які мають місце у щілині між клином інструменту і вершиною тріщини та приводять до утворення водневої плазми. На підставі узагальнення досліджень, присвячених різним фізико-хемічним явищам, що виникають у момент руйнування твердого тіла, зроблено спробу розглянути зниження енерговитрат на процес різання металу у МОТЗ як результат сукупного механічного і теплового впливу. Додатковим джерелом тепловиділення є рекомбінація йона Гідрогену в ультрамікроскопічних областях безпосередньо в зоні подолання зчеплення між атомами оброблюваного металу. Запропонований спосіб механоплазмового оброблення металу не тільки має високу ефективність, а й уможлиблює виготовляти вироби з підвищеною експлуатаційною довговічністю.

Ключові слова: деформація, руйнування, тріщина, активация, водень, протон, радикали, йонізація, плазма, дифузія.

A model of surfactant lubricant-cooling agent (SLCA) transformation to radically active hydrogen plasma in the cutting zone is proposed. This phenomenon is strongly expressed when the composition of SLCA includes a macromolecular compound having specified chemical composition and concentration. Since the chain of pyrolytic transformations of polymer additives to SLCA leads to hydrogen and carbon appearance in atomic and other active forms,

the hypothesis of both the active participation of protons in the mechanochemical process during the metal treatment and the simultaneous permanent carbonization of cutting edge of tool. The experimental data show that the interaction between various contact material and environment as well as the physical and chemical processes, which occur as a result of the metal fracture, are associated primarily with the electrical activity of the real structure of the material arising as a result of mechanical action. The crucial role of formation and the crack growth is demonstrated as a factor of initiation and acceleration of various physical and chemical processes and phenomena occurred in the gap between the tool wedge and the crack tip, which lead to the hydrogen plasma formation. Based on the synthesis of investigations dedicated to various physicochemical phenomena occurring at the moment of a solid body failure, an attempt of consideration of the reduction of energy consumption during the metal cutting process in SLCA as a common result of mechanical and thermal effects. The recombination of hydrogen ion is an additional heat source in the ultramicroscopic areas directly in the region of overcoming the bonding between atoms of the treated metal. The proposed method of mechanoplasmic treatment of metal not only has a high efficiency, but also allows fabrication of the pieces having high operational durability.

Key words: deformation, fracture, crack, activation, hydrogen, proton, radicals, ionization, plasma, diffusion.

(Получено 16 июня 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие представлений о механизме влияния различных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на процессы деформации и разрушения металла и, в частности, на процесс его механической обработки резанием, а также достижения в смежных областях науки позволили предложить, а затем экспериментально подтвердить гипотезу о химической активации исходного состава СОТС в зоне разрушения с образованием на заключительном этапе водородной плазмы и углерода [1–4]. Предполагалось, что первым процессом многоэтапных химических превращений является распад углеводородной составляющей СОТС на горячих поверхностях стружки и инструмента с образованием газовой смеси, состоящей из гомологического ряда алифатических предельных углеводородов, электронов, водорода в его активных формах, а также углерода. Полагалось также, что в дальнейшем газовая смесь поступает в реакционную щель — пространство, ограниченное поверхностями клина инструмента, ювенильными поверхностями трещины разрушения и её вершиной, где увеличивается степень ионизации газа до образования водородной плазмы (рис. 1).

В дальнейшем это предположение было подтверждено экспериментальными данными, которые показали, что после резания ме-

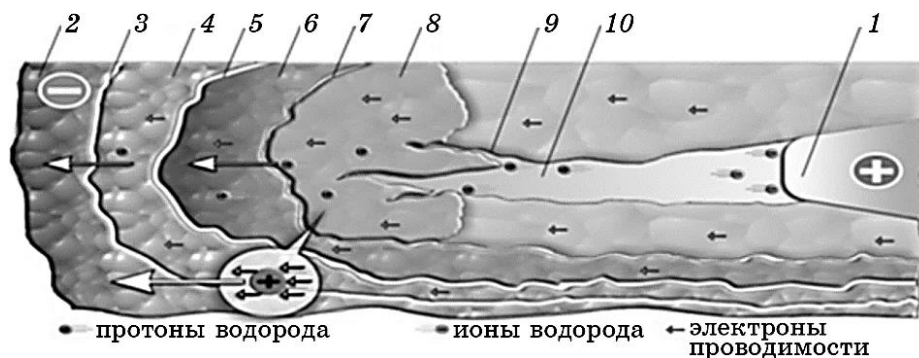


Рис. 1. Схематическое изображение реакционной зоны: 1 — лезвие режущего инструмента, 2 — обрабатываемый металл, 3 — переходная область, 4 — область упругой деформации, 5 — область начального движения дислокаций, 6 — область пластической деформации, 7 — область докритического подрастания трещин, 8 — область разрушения, закритическая стадия роста трещин, 9 — ювенильные полости трещин, 10 — магистральная трещина, заполненная водородной плазмой.

Fig. 1. Schematic representation of the reaction zone: 1—the blade of the cutting tool, 2—processed metal, 3—transition area, 4—area of the elastic deformation, 5—area of initial motion of dislocations, 6—area of plastic deformation, 7—area of subcritical crack growth, 8—area of destruction, overcritical stage of crack growth, 9—juvenile cavity of cracks, 10—trunk crack filled with hydrogen plasma.

талла в СОТС, в его приповерхностных слоях и стружке содержится водород. Это означало, что водород своевременно поступает в зону разрушения и влияет на процессы разрыва и перестройки связей.

Следовательно, в экстремальных условиях механической обработки транспорт водорода в зону разрушения своевременно может поступать только путём его перемещения между узлами решётки в протонном состоянии, и диффузионный поток заряженных частиц водорода может происходить благодаря наличию в системе металл-водород электрического поля. Демонстрируя в зоне преодоления сцепления между атомами трибологическую активность (механо-плазменный эффект) водород тем самым способствует облегчению процессов деформации и разрушения обрабатываемого металла. Одновременно с этим углерод, в виде графита, накапливаясь в процессе резания на режущих кромках, снижает трение между контактирующими поверхностями, а также осуществляет перманентную карбонизацию лезвия инструмента. Оба эти процесса повышают износостойкость инструмента и уменьшают энергосиловые затраты на механическую обработку.

Выводы, которые вытекали из первых результатов экспериментальной проверки гипотезы, свидетельствовали о её большом прак-

тическом значении, так как отсюда следовали непосредственные рекомендации искать эффективные присадки к СОТС среди полимерных соединений, дающих в цепи пиролитических превращений большую концентрацию активных форм водорода (радикалы, ионы, ион-радикалы) и углерода.

Несмотря на полученные на первом этапе работы разносторонние и весьма обнадёживающие экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу предложенной гипотезы, последняя, безусловно, нуждалась и нуждается в дальнейшей проработке и апробации.

2. ОБЪЕКТЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения поставленной задачи использовались различные методы исследований и аппаратура, большинство из них стандартные, другие — разработаны в процессе выполнения работы. Исследовались газообразные продукты, образующиеся в процессе резания при пиролизе полимерной компоненты в СОТС. В качестве присадки использовали полиэтиленовую эмульсию ОКСАЛЕН-30, полиэтилен молекулярной массы 100000 и поливинилхлоридную эмульсию. После пиролиза ампула наполнялась гелием до атмосферного давления с целью дальнейшего ввода её содержимого в шприц-камеру хроматографа.

Анализировалась газовая фаза, образующаяся при сверлении стали в соответствующей среде. Отбор газов проводился стандартизировано с помощью калибровочного натекателя в объём (1 л) в течение 1,5 мин. Все летучие продукты собирали вначале при температуре жидкого азота. Конденсированную фракцию (время конденсации 30 мин) концентрировали, перемораживая её в малый объём с последующим заполнением ампул гелием для проведения хроматографического анализа. Сверление стали 1Х18Н9Т проводили сверлом Р18, $d = 5$ мм, при скорости вращения сверла 1500 мин^{-1} . Для этого на дно стального стакана тонким слоем наносили эмульсию полимера и закрывали крышкой с двумя отверстиями: для ввода сверла и отбора газообразных продуктов, образующихся при сверлении. Анализ газовой фазы проводился на газовом хроматографе СHROM-5. Высокая чувствительность хроматографа позволяла идентифицировать газы в количестве не менее 10 моль.

Обнаружение водорода в стружке и в обрабатываемой поверхности проводилось с помощью автоматического анализатора типа RH-1E, электронно-микроскопических исследований на установке ЭВМ-100АК и методом температурно-программируемого нагрева образца (ТПН), помещённого в вакуумированный объём с одновременной масс-спектрометрической регистрацией выделяющегося водорода.

Большая часть данных о проникновении водорода в металл при

сверлении и точении была получена с помощью ТПН. Сверлились образцы из стали 20 и армко-железа. Параметры резания: $N = 450$ мин⁻¹, подача — 5 мм/мин, сверло — Р8М5. Сверление проводилось в следующих средах: H₂O, D₂O, атмосферный воздух, азот, гептан, эмульсия полиэтилена в воде и вазелинового масла в воде. Кроме того, сверлился образец стали, предварительно насыщенный водородом электролитическим методом. В опытах по сверлению объектом исследования была стружка одинаковой навески (50 мг). Все эксперименты по сверлению проводились с образцами, предварительно отожжёнными при температуре 700 К в течение 10 часов, что было связано с необходимостью удаления остаточного металлургического водорода.

Для изучения химического состава поверхности металла, полученной после механической обработки в различных СОТС, использовали метод сканирующей оже-спектроскопии. В отдельных случаях модельных испытаний в качестве добавок в СОТС использовались полимеры различного химического состава, молекулярной массы и концентрации.

Степень влияния состава СОТС или модельных сред на технологические и энергосиловые характеристики процесса резания оценивали по величине составляющей силы резания P_x при точении, $M_{кр}$ при сверлении при одновременной регистрации стойкости инструмента, усадки стружки, качества обработанной поверхности. При различных режимах механической обработки и вида инструментального материала испытывались чистые металлы Fe, Ti, Ni, Mo, Co, а также железо с различными легирующими добавками и твёрдостью. Методики определения составляющей силы резания P_x и критерия затупления, основанные на систематическом измерении по мере работы инструмента максимальной величины износа по задней поверхности, а также качества обработанной поверхности и усадки стружки, являются общепринятыми. Также общепринятыми являются применяемые в работе методы оценки влияния состава СОТС на механическое и физическое состояние обработанных поверхностей и некоторые эксплуатационные характеристики обрабатываемого материала.

Большинство результатов исследований по рассматриваемой проблеме опубликовано в монографиях [1, 2]. В рамках данной работы исследования были сконцентрированы на заключительном этапе механизма влияния исходной поверхностно-активной среды на обрабатываемость металла. А именно на этапе взаимодействия электрически активного водорода с реальной электрически активной структурой металла, образующейся вследствие механического воздействия. Такие взаимодействия сопровождаются выделением тепловой энергии, которая в совокупности с механической облегчает процессы деформации и разрушения твёрдого тела.

3. ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ВЫЯВЛЕНИЮ МЕХАНОПЛАЗМЕННОГО ЭФФЕКТА

Познание законов такого исключительно сложного по своей многоплановости и экстремальности условий протекания процесса, каковым является процесс резания металла при непрерывном поливе жидкости с несколькими десятками растворённых и эмульгированных в ней компонентов, чрезвычайно затруднено из-за отсутствия каких-либо, пусть даже фрагментарных данных относительно соответствующего набора входных параметров (например, поля температур, давлений, концентраций, геометрии системы в зоне резания и т.п.), параметров, без знания которых бессмысленно строить какие бы то ни было теоретические модели. Вместе с тем, можно выделить ряд проблем, решение которых даёт возможность продвинуться в данном вопросе в правильном направлении. Среди них наиболее важны: механизмы, инициирующие в зоне разрушения химические превращения исходной поверхностно-активной среды и самоактивацию образовавшихся взаимодействующих систем; физико-химические акты экзотермических реакций, сопровождающихся вспышкой тепловой энергии вследствие контактных взаимодействий электрически активных частиц водорода с электрически активной реальной структурой деформируемого металла; влияние механической и термической энергии на процесс резания.

Учитывая важность информации о микроскопических и феноменологических особенностях кинетики распространения трещины, определяющих теоретическую и действительную прочность, представляется важным оценить роль вышеотмеченных факторов на движение трещины. В этом отношении основную ценность приобретает решающая роль образования и развития трещин, как фактора, инициирующего химическое превращение, которая была показана в прямых опытах: механическое воздействие на металл при фиксированной температуре приводит не только к его разрушению, но и сопровождается химическим превращением окружающей среды [2, 5]. В связи с этим, одним из наиболее важных направлений, способствующих развитию представлений о природе разрушения в процессе резания металла в СОТС, является изучение зарождения и распространения трещины в таких условиях.

Рассмотрим ситуацию, которая складывается в области реакционной зоны, где концентрируются локальные механические напряжения, температура и активные элементы окружающей среды, т.е. в области преодоления сцепления между атомами металла. При этом следует учитывать, что исходная поверхностно-активная углеводородная составляющая СОТС уже активирована на горячих поверхностях зоны резания с образованием газовой смеси.

Схематично показанная реакционная зона (рис. 1), сформирова-

на одновременно с началом процесса резания и состоит из двух частей: пространства, ограниченного клином инструмента и поверхностями обрабатываемого материала, а также микроскопической щелью межатомного масштаба, образующейся в связи с взаимодействием дислокаций на самых ранних стадиях пластического деформирования тела. Следует отметить, что изображение реакционной зоны соответствует представлению о физике разрушения металла в процесс его резания, которое предполагает наличие перед клином инструмента пространства, переходящего в микротрещину атомного масштаба [1, 6].

В связи с разрушением металла в реакционной зоне постоянно протекает сопутствующий этому процессу ряд физико-химических явлений, взаимосвязь которых с углеводородной газовой смесью, проникающей в зону через сеть микротрещин и других дефектов, вызывает образование водородной плазмы и эти же процессы и явления определяют вектор перемещения протонов, направленный к вершине трещины разрушения. Ионизаторами веществ, входящих в состав газовой смеси, являются: каталитически активная вновь образующаяся ювенильная поверхность, электроискровые разряды в зоне контакта инструмента с заготовкой, поток электронов большой энергии и интенсивности, вылетающий из зоны преодоления сцепления между атомами в микрощель, и температура [7].

Возникающие в зоне разрушения различные физико-химические процессы и явления, имеющие квантовую природу, с одной стороны, являются источниками, вызывающими образование водородной плазмы в результате их многоэтапных контактных взаимодействий с окружающей средой, а с другой, некоторые из них действуют как потенциалы, определяющие вектор и скорость перемещения электрически заряженных частиц водорода, составляющих водородную плазму. В дальнейшем заряженные частицы водорода в связи с различными взаимодействиями рекомбинируют с выделением тепловой энергии.

Таким образом, совокупность экспериментальных данных показывает, что облегчение преодоления сцепления между атомами твёрдого тела и вскрытие новой поверхности в ультрамикроскопических областях, где концентрируется предельная энергия, т.е. проявление механоплазменного эффекта подготовлено и обусловлено следующими протекающими процессами и явлениями [2, 4]:

1. пиролизом на горячих поверхностях стружки и инструмента химических соединений, составляющих поверхностно-активную жидкость (СОТС), и образованием новой фазы — углеводородной газовой смеси, состоящей из алифатических предельных углеводородов от C_3 до C_7 ;
2. диффузией газовой смеси в реакционную щель;
3. контактными взаимодействиями химических элементов, со-

ставляющих газовую смесь, с выходящими на поверхности реакционной щели ступенями скола и другими электрическими активными элементами реальной новой поверхности; вследствие таких взаимодействий образовавшийся ионизированный газ представляет собой смесь нескольких сортов частиц: электронов, однократно заряженных положительных ионов и нейтральных молекул; в нём должны присутствовать также и многократно заряженные ионы, а также отрицательно заряженные ионы;

4. первичной ударной ионизацией молекул и атомов водорода в результате их столкновения с электронами высокой энергии; образующиеся вторичные электроны вновь ионизируют оставшиеся в смеси газа молекулы и атомы водорода и, следовательно, общее количество электронов и ионов будет возрастать, увеличивая степень ионизации газовой смеси;

5. образованием ионизированного водорода в связи с электроискровыми разрядами при разрыве электрического контакта между электрически активными элементами поверхностей лезвия инструмента, заготовки и среды;

6. формированием и перемещением потока положительно заряженных частиц водорода из ионизированной газовой смеси в направлении объёмного отрицательного заряда заготовки и локального отрицательного заряда вершины трещины;

7. рекомбинацией иона водорода.

Известно, что ионизированный водород является носителем значительного количества энергии и при взаимодействии его частиц между собой, а также с электронами проводимости или ионами металла, выделяется большое количество тепловой энергии (100 ккал/моль). Этот процесс протекает при подлёте протонов к поверхности устья трещины, непосредственно на её поверхности и в наиболее дефектной области материала перед вершиной трещины. Совокупное действие внешней механической и внутренней тепловой энергии, ускоряет разрушение и снижает энергетические затраты на образование новой поверхности.

К процессам, обеспечивающим направленное перемещение из плазмы положительно и отрицательно заряженных частиц, следует отнести:

– электромагнитное поле, возникающее в связи с образованием в процессе резания в системе «станок–инструмент–заготовка–заземляющее устройство» термоэлектродвижущей силы;

– отрицательный объёмный заряд заготовки и положительный заряд инструмента, образующиеся в связи с постоянным стоком электронов из инструмента (более горячей части) в заготовку (более холодную часть);

– предельно сконцентрированный отрицательный электрический заряд перед кончиком трещины, сформированный в связи с

повышенной концентрацией электронов в области, где материал становится неоднородным, сначала вследствие границ зёрен, затем субзёрен и, наконец, дислокаций и атомов (эффект Холла). Отметим, что такие дефекты структуры замедляют перемещение свободных электронов и ионизированного водорода в электрическом поле, являясь их ловушками.

Таким образом, имеются все основания полагать, что возникающие в процессе роста трещины вышеперечисленные физико-химические процессы и явления создают особые условия, необходимые для формирования из поверхностно-активной среды её радикально активного варианта, переноса этой среды в зону преодоления сцепления между атомами, а затем, вследствие проявления эффекта электронного «ветра», осуществления амбиполярной диффузии протонов и электронов проводимости в срезаемом слое металла со скоростью значительно превышающей скорость его разрушения [2]. В связи с этим, согласно предлагаемой модели, микрощель можно представить, как естественно созданный в процессе резания реактор, в котором поступающая в его пространство среда подвергается комплексному воздействию сопровождающих процесс резания различных физико-химических процессов и явлений. Следовательно, образование и рост трещин фактически играет роль спускового устройства, включающего механизм начала и развития механоплазменного эффекта.

4. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ И ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ВОЗНИКНОВЕНИЯ МЕХАНОПЛАЗМЕННОГО ЭФФЕКТА

4.1. Факторы, обуславливающие образование водородной плазмы

Очевидно, что возможность образования плазмы и максимальный эффект тепловыделения будет в том случае, если в состав среды ввести небольшую добавку высокомолекулярного соединения (например, 1,5% полиэтилена в масляную основу СОТС или 1,5% эмульсии поливинилхлорида в водную) определённого физико-химического свойства, дающего в цепи термохимических превращений, по сравнению с другими веществами, максимальную концентрацию активных форм водорода и углерода при минимальной энергии активации процесса.

Важно отметить, что скорость образования газовой смеси так же, как и скорость её превращения в водородную плазму являются параметрами, контролирующими проявление механоплазменного эффекта. Они зависят от эффективности действия ионизаторов, а также от физико-химических свойств полимерной присадки к СОТС, её молекулярной массы и концентрации, состояния поверх-

ности адсорбата и температуры. Что касается скорости химического превращения газовой смеси в водородную плазму, то она ещё зависит от концентрации в газовой смеси водорода и углеводородных фрагментов, образовавшихся вследствие разрыва макроцепи полимера.

Влияние вышеперечисленных факторов на скорость протекания химических реакций исходной поверхностно-активной среды до образования радикально-активной анализировалось в работах [1, 2]. Здесь рассмотрим только особую важность влияния ионизаторов на реализацию многостадийных превращений среды.

Как уже отмечалось, ионизаторами водородосодержащей газовой смеси являются экзоэлектронная эмиссия, каталитически активные поверхности полости трещины и температура. В возникновении первых двух решающее значение принадлежит трещине, образование и рост которой играет роль спускового устройства, включающего в работу поток электронов, испускаемый из вершины трещины, и чистые ювенильные вновь образующиеся поверхности. Что касается теплоты, то являясь одним из основных физических показателей процесса резания, она может непосредственно влиять как на процесс ионизации, так и ускорять химические реакции на каталитически активных поверхностях.

Известно, что источниками тепловыделения при резании являются пластическая деформация, имеющая место, прежде всего, в зоне максимальных сдвигов (вершина трещины), и трение в зонах контакта стружки с передней поверхностью инструмента и заготовки с задней поверхностью инструмента. Важно отметить, что температура отдельных микрообъемов в результате единичных актов пластической деформации повышается до тысячи градусов [2], что может привести к ионизации углеводородной составляющей СОТС. Что касается скорости химической реакции на полостях трещины, то она экспоненциально зависит от температуры [7].

Известно, что разрушение или существенное ослабление химических связей между исходными молекулами (атомами) среды, которое должно произойти, чтобы началась химическая реакция, осуществляется в результате теплового движения атомов. Вместе с тем, энергия, необходимая для разрушения связи, намного превосходит среднюю энергию теплового движения атомов. Следовательно, лишь молекулы, тепловая энергия которых намного превышает среднюю энергию теплового движения, могут вступить в химическую реакцию. Доля же активных молекул в газовой смеси незначительна ($y \propto \exp\{-E/(RT)\}$), следовательно, незначительна и скорость химической реакции. Однако, если в системе существует возможность превышения теплоподвода над теплоотводом, что, вероятно, имеет место в данном случае, то реакция может самоускоряться, резко изменяя характер своего течения. Таким образом,

медленное, практически незаметное реагирование газовой смеси может смениться быстрым, экспоненциальным во времени ростом скорости реакции [7, 8].

Скорость химического превращения газовой смеси в плазму под действием электронов в результате ударной ионизации, с последующим переходом в лавинообразную стадию «воспроизводства» новых ионов и электронов, зависит от двух факторов: вероятности столкновения электронов с атомами или молекулами водорода и величины кинетической энергии электронов и атомов водорода. Экспериментально было установлено, что энергия электронов, вылетающих из вершины трещины вследствие механического воздействия на материал, примерно равна или превышает энергию химической связи. При разрыве межатомных связей из устья трещины вылетают дополнительно ускоряемые электрическим полем электроны (интенсивность $6 \cdot 10^3$ импульсов в минуту) с энергией более 10^2 эВ, что превышает энергию ионизации атома водорода (13,535 эВ) и энергию химической связи (примерно 10^2 эВ) [9]. Следовательно, у вершины трещины создаются условия для окончательной ионизации водорода.

4.2. Влияние электрического поля на диффузию заряженных частиц в зону разрушения

Особое значение в рассматриваемой системе приобретает кинетический фактор, ибо для реализации механоплазменного эффекта необходимо, чтобы потоки протонов своевременно поступали не только к вершине трещины, но и в микрообласти материала у её вершины, где осуществляются акты перестройки и разрушения связей. Условия для этого создаются естественным путём непосредственно при механической обработке металла, где высокая температура в зоне контакта двух разнородных материалов (инструмент и заготовка) вызывает термоэлектрический ток в цепи «инструмент–стружка–заготовка–станок». В связи с постоянным стоком электронов с инструмента в заготовку инструмент приобретает объёмный положительный заряд, а заготовка — объёмный отрицательный заряд, что предопределяет вектор перемещения из плазмы заряженных частиц водорода: протоны перемещаются вдоль щели к вершине трещины, а отрицательно заряженные частицы к инструменту.

При переходе потока протонов в твёрдое тело одна часть протонов будет свободно перемещаться через решётку, а другая — адсорбироваться на поверхности и в объёме материала на дефектах кристаллической структуры, которые могут служить центрами захвата (ловушками) водорода. Являясь носителем значительного количества энергии, протоны взаимодействуют на поверхности не только с

электронами и между собой, но и с атомами тела. Во всех этих реакциях также выделяется большое количество тепловой энергии (от 60 до 100 ккал/моль). Другая часть протонов плазменной струи, не принимавших участие в химических превращениях на поверхности, продолжает диффундировать в объём материала в область высоких локальных механических напряжений перед кончиком трещины, насыщенной различными дефектами.

При «входе» протонов в твёрдое тело они должны пройти переходную область под поверхностью [10]. В этой переходной области образуется новая газовая смесь, состоящая из электронов проводимости и положительно заряженных частиц водорода, в которой электроны оказываются окружёнными «облаком» положительного заряда. Результирующая величина заряда такого образования превышает заряд электрона и поэтому электрон, вместе с окружающим его «облаком» водорода, будет притягиваться к другому свободному электрону [10]. Электроны проводимости и водород фактически становятся «связанными» друг с другом и под действием внешнего электрического поля продолжают совместное перемещение вдоль срезаемого слоя.

Увлечение протонов электронами проводимости настолько велико, что положительно заряженные ионы водорода двигаются в сторону анода, против поля, подобно частицам с отрицательным зарядом [10]. Несмотря на то, что скорость такого коллективного перемещения электронов и протонов уменьшится по сравнению со скоростью перемещения одних электронов в $(m_{H^+}/m_{e^-})^{1/2}$ раз, она всё же будет значительно превышать скорость роста трещины. Это означает, что водород своевременно поступает к вершине трещины и в микрообъём материала перед её острием.

Превышение скорости диффузии водорода над скоростью разрушения металла подтверждается следующими экспериментальными данными.

Проводилось сверление стали-45 в воде и в воде с добавкой (1,5%) латекса поливинилхлорида. Затем полученные отверстия рассверливали на воздухе сверлом, диаметр которого на 1 мм превышал диаметр исходного отверстия. Затем поверхности исходного и рассверленного отверстия анализировались. Для обнаружения водорода в материале применялся метод температурно-программируемого нагрева образцов, помещённых в вакуумируемый объём, с одновременной масс-спектроскопической регистрацией выделяющегося водорода. Установлено, что масс-спектрометрический сигнал, характерный для водорода, давали образцы, как после сверления в воде, так и в воде с добавкой полимера. Однако пик сигнала водорода при сверлении в воде с полимером многократно превышал пик сигнала водорода, который давали образцы после сверления в воде без полимера, что свидетельствует о химических преобразованиях

полимерной добавки с образованием большой концентрации водорода. Наиболее важно, что в спектре после рассверливания на воздухе, также обнаруживался пик водорода с интенсивностью, равной примерно 10% от исходного значения, тогда как в образцах после сверления в воде без полимера, после рассверливания сигнал водорода отсутствовал. Следовательно, в процессе механоплазменной обработки скорость перемещения водорода действительно превышает скорость разрушения.

Таким образом, для возникновения механоплазменного эффекта в зоне резания реализуются естественным путём все необходимые для этого условия.

4.3. Совокупное влияние теплового движения атомов и внешних сил на разрушение структуры

В проблеме создания механоплазменного эффекта особое место занимает тепловой импульс, передаваемый металлу вследствие контактных взаимодействий электрически заряженных частиц водорода с новой электрически активной реальной структурой, возникшей в результате механического воздействия на твёрдое тело. Не менее важное влияние оказывают также кратковременные и достаточно продолжительные электрические процессы, протекающие в момент разрушения.

Акты тепловых вспышек с последующим волновым распространением тепловых эффектов происходят в различных местах зоны разрушения: сначала в пространстве щели, а затем на поверхностях у вершины трещины и в области опережающих деформаций материала перед острием трещины (рис. 1).

При столкновении в пространстве щели протонов, движение которых к вершине трещины ускоряется электрическим полем, с электронным потоком, излучаемым из вершины трещины вследствие разрыва межатомных связей, происходит рекомбинация иона водорода с последующими новыми актами химического превращения образовавшихся продуктов: $H^+ + e^- \rightarrow H + h\nu$, $H + H \rightarrow H_2 + h\nu$. Причём, процессы, протекающие в интервале времени от возникновения первичных ионов до образования новых (а также молекулярных продуктов и свободных радикалов) завершаются всего за 10^{-5} с [10].

При контакте твёрдой и газовой фаз реакция ионов водорода на поверхности протекает также путём их рекомбинации. Образовавшиеся при этом атомы водорода хемосорбируются на поверхности по схеме: $2H + Fe \rightarrow H_2 + Fe^* + h\nu$, $Fe + H_2 \rightarrow Fe + H + H + h\nu$, где Fe^* — возбуждённый атом железа [9, 11].

Нагрев поверхностного слоя, вызывая напряжённое состояние сжатия, исключает возможность развития трещин [12]. Однако

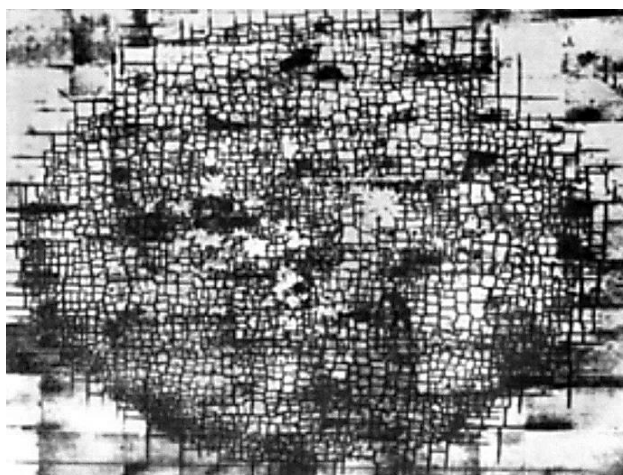


Рис. 2. Очаг поражения кристалла LiF(100) после плазменного удара [14].

Fig. 2. Fracture nucleus of LiF crystal (100) after the plasma stroke [14].

благодаря мощному скольжению и взаимодействию дислокационных полос создаются условия для зарождения большого числа микротрещин (рис. 2).

Причина столь хрупкого поведения, по-видимому, заключается в большой скорости деформации растяжения, вызванной высоким темпом охлаждения, которая подавляет возможность значительной пластической деформации [12].

Проникновение атомарного водорода через слой атомов металла под его поверхность затруднено, поскольку для этого необходимо преодолеть потенциальный барьер. Однако, в данном случае, положительно заряженные ионы водорода под воздействием внешних сил (электрического поля) легко переносятся в переходную область, а затем, благодаря эффекту электронного «ветра», протоны переходят в объём, свободно перемещаясь между узлами решётки. В процессе электропереноса часть диффундирующего водорода может захватываться в поры, имеющие технологическое происхождение, а также в поры, образовавшиеся в связи с кластеризацией вакансий. Кроме того, водород может захватываться точечными, линейными, поверхностными и объёмными дефектами [11]. В результате различных взаимодействий электрически активных частиц водорода, захваченных ловушками, высвобождается большое количество тепловой энергии. Со временем количество диссипированного тепла возрастает, что приводит к локальному оплавлению материала.

При взаимодействии протона с точечными и линейными дефектами может происходить и хрупкое разрушение [12]. В этом случае

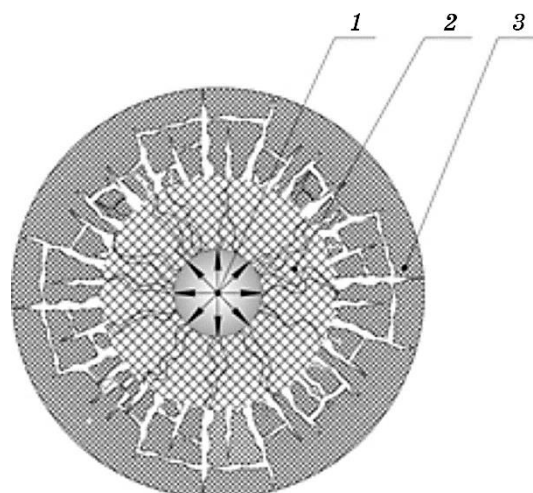


Рис. 3. Распределение трещин после теплового удара: 1 — зона вспышки химического превращения, 2 — зона раздавливания материала, 3 — распределение трещин в зоне растрескивания.

Fig. 3. Distribution of cracks after heat stroke: 1—zone of chemical transformation flare, 2—zone of the material crushing, 3—distribution of cracks in the cracking zone.

от очага, где произошла импульсная тепловая вспышка, волны напряжения распространяются во все стороны, образуя в микрообъеме тела сложную картину распределения напряжений сжатия и растяжения (рис. 3), определяемых интерференций падающих и отражённых от внутренних поверхностей тела волн (границы зёрен, фаз, двойников, выделений).

В первоначальный момент высокий температурный градиент, образующийся в микрообъеме материала, а также высокая скорость его приложения вызывают необратимую деформацию сжатия. При охлаждении, если запас пластичности оказывается недостаточным для релаксации возникающих в микрообъеме растягивающих напряжений, деформация будет протекать путём образования сетки трещин и последующего вскрытия их полостей.

Таким образом, в микромасштабе при механоплазменной обработке металла будет наблюдаться как вязкий, так и хрупкий характер разрушения и между этими процессами не может быть жёсткой границы. Ведущая роль того или иного характера разрушения определяется параметрами обработки, физико-химическими свойствами металла, а также интенсивностью проявления плазменного эффекта, который зависит от следующих факторов: 1) скорости образования и своевременного поступления углеводородной газовой смеси в реакционную щель, её концентрации и состава; 2) скорости

химического превращения газовой смеси в водородную плазму; 3) направления перемещения и скорости диффузии ионизированного водорода как к вершине трещины разрушения, так и непосредственно в зону преодоления сцепления между атомами. Чрезвычайно важную роль в увеличении теплового эффекта реакции играет также состав исходной поверхностно-активной среды (СОТС).

Совокупность отмеченных выше факторов обуславливает не только различные варианты разрушения, но и энергозатраты на обработку, которые уменьшаются вследствие синергетического действия на материал внешней механической энергии и внутренней тепловой.

Такие процессы наиболее ярко выражены непосредственно в зоне преодоления сцепления между атомами перед острием трещины, где повышение внутренней потенциальной энергии кристаллической решётки, вследствие тепловых вспышек, будет способствовать разупрочнению (рекристаллизации) материала. Повышение температуры в этой области приведёт к увеличению скорости движения дислокаций, снижению предела текучести и уменьшению длины площадки текучести, снижению концентрации напряжений вокруг скопления дислокаций, устранению или уменьшению числа препятствий перемещению дислокаций [2, 13].

Кроме этого в результате температурной активации существует вероятность изменения механизма разрушения. Например, когда межкристаллические связи могут оказаться слабее связей внутри самих зёрен, и разрушение материала будет происходить по границам зёрен, а не внутри них [14].

Систематические исследования влияния высоких скоростей нагрева металла на его свойства позволили получить важные в теоретическом и практическом отношении результаты о фазовых и структурных превращениях в сплавах при импульсном нагреве [15]. Эти исследования дают основание полагать, что аналогичные процессы могут происходить в металле при тепловой вспышке. Действительно, исследования, проведённые в этом направлении, показали [1–4], что в своих конечных проявлениях эффекты, вызванные быстрым нагревом и охлаждением, при макроскопическом рассмотрении проявляются в облегчении процессов деформации и разрушения металла и в связи с этим в значительном снижении энергозатрат на его обработку. Именно поэтому обработку металла резанием в различных СОТС следует рассматривать не как механический процесс, а как механоплазменный, эффективность которого многократно повышается в результате введения в состав СОТС добавок высокомолекулярных соединений, дающих в цепи пиролизных превращений большую концентрацию водорода [2].

Таким образом, облегчение процессов деформации и разрушения материала в поверхностно-активных СОТС вызвано фундаменталь-

ным явлением природы — тепловым движением, дополнительный импульс которому даёт рекомбинация ионов водорода. В наиболее чистом виде такой механизм реализуется при хрупком разрушении, а при других видах разрушения ему начинают сопутствовать релаксационные процессы, которые по мере увеличения температуры играют все большую роль.

По-видимому, при резании, когда разрушение металла происходит с огромными скоростями, релаксационные процессы не могут играть существенной роли. Следовательно, согласно предлагаемой гипотезе, все изменения физико-механических свойств металла, деформируемого в поверхностно-активной среде, подготавливаются протонами водорода, обладающими положительным электрическим зарядом. Различные взаимодействия электрически активного протона с электрически активной реальной структурой металла приводят к рекомбинации иона водорода с образованием атомарного и молекулярного водорода. И главное, эти процессы сопровождаются выделением большой тепловой энергии, которая локализуется в основном в области структурных дефектов металла (в ловушках) и может повысить температуру этой зоны до температуры плавления. В этих же ультрамикроскопических областях локализована механическая энергия предельной плотности. Совокупное действие механической и тепловой энергии облегчает процессы деформации и разрушения. Это означает, что потеря телом устойчивости происходит в результате реализации механоплазменного эффекта.

Важно отметить, что предлагаемая модель находится в соответствии с ранее высказанными положениями о том, что плавление представляет собой разрушение кристалла за счёт теплового движения ионов, а механическое разрушение — это «плавление», вызванное действием механических напряжений [16].

То обстоятельство, что при рекомбинации ионов водорода происходят тепловые микровзрывы, в результате чего в атомных группировках металла температура может значительно превышать температуру его плавления, находит подтверждение в результатах исследований о влиянии водорода на поведение металла при термоциклировании [17].

Изучение поведения металла при термоциклировании в среде молекулярного водорода, позволило установить, что водород в этих условиях «понижает температуру плавления металлов и снижает более чем на три порядка предел текучести». Важность и новизна полученных результатов послужили основанием для выдачи диплома на открытие авторам обнаруженного эффекта.

Проведённый нами анализ некоторых исследований авторов открытия показал, что плавление железа действительно происходило, когда в испытательной камере заполненной водородом была

температура примерно на 600°C ниже температуры его плавления.

Полученные результаты авторы открытия объяснили «... образованием между растущими и исчезающими кристаллами переходного слоя, пересыщенного водородом, в результате перестройки кристаллической решётки приводящего к самопроизвольному деформированию металлов в твёрдом состоянии».

Процессы и явления, протекающие в условиях эксперимента при термоциклировании металла, находятся в полном соответствии с предлагаемой в данной статье моделью. С нашей точки зрения, обнаруженный «эффект» понижения температуры плавления металлов на самом деле вызван следующими процессами. При термоциклировании (нагрев–охлаждение) на поверхности образца возникают микротрещины, полости которых обладают каталитической активностью. Исходная температура в камере ускоряет процесс диссоциации молекулярного водорода на этих поверхностях. Образовавшиеся протоны диффундируют в объём металла, захватываются ловушками, в которых происходит их рекомбинация с образованием тепловой энергии.

Следовательно, при термоциклировании в материале происходят тепловые микровзрывы, и в результате реакции высвобождается большое количество теплоты. Ультрамикроскопические области материала разогреваются и рассеивают теплоту в прилегающие области. С ростом количества реакций возрастает температура и наступает процесс плавления материала. Со временем количество поглотившегося тепла в процессе реакции увеличивается, область оплавления расширяется, вовлекая все больший объём материала в этот процесс.

Таким образом, плавление железа, как без водорода, так и с водородом всегда происходило и происходит при 1539°C . В эксперименте эта температура в материале достигалась за счёт суммарного тепла от внешнего источника, вызывающего нагрев материала до 950°C , и внутреннего источника, повышающего температуру сначала локально, а затем и во всем объёме образца. Именно поэтому на фотографиях образцов после испытаний наблюдаются места плавления железа на локальных участках материала (рис. 4).

В общем случае тепловыделение, сопутствующее различным взаимодействиям протона с реальной структурой деформируемого металла, генерирует следующие процессы и явления, влияющие на прочность последнего:

- увеличивает частоту тепловых колебаний атомов металла, что приводит к активизации процесса пластической деформации и повышению вероятности разрыва межатомных связей;
- облегчает процессы скольжения кристаллов;
- снижает напряжение трения кристалла и напряжение, необходимое для начала движения дислокаций в связи с их освобождени-

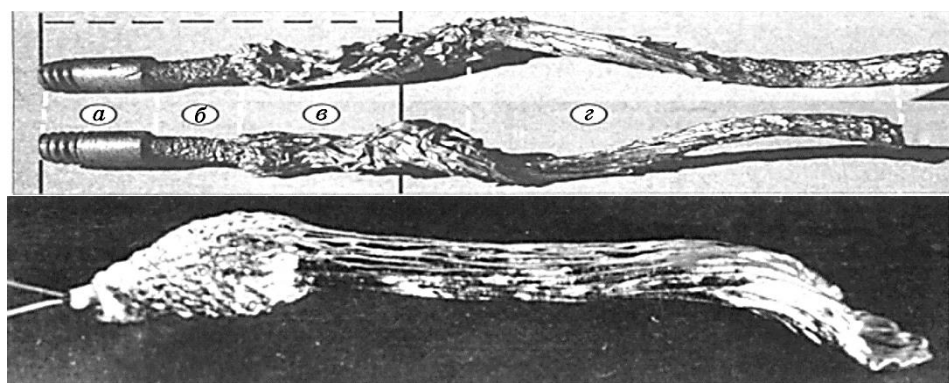


Рис. 4. Образцы армко-железа после термоциклирования (температура 950°C) [17].

Fig. 4. Samples of armco iron after thermal cycling (temperature 950°C) [17].

ем от примесных атмосфер;

- увеличивает скорость перемещения дислокаций и облегчает преодоление ими препятствий;

- снижает уровень деформирующего напряжения, необходимого для движения дислокаций по пересекающимся системам скольжения;

- увеличивает вероятность «втягивания» протона в электронные оболочки ионов железа вплоть до самых глубоких уровней, что также приводит к повышению окклюзии водорода;

- вызывает снижение предела текучести, уменьшает площадку текучести и напряжение деформационного упрочнения, способствует ускорению процесса зарождения трещин, их докритическому, а затем и закритическому росту.

В свою очередь, некоторые отмеченные выше процессы и явления способны вызвать новые изменения деформируемого материала:

- увеличение концентрации водорода в ловушках так же, как и возможное возникновение гидридов и гидридоподобных образований, может способствовать не только образованию кластеров, но и их переходу в атомарно острую трещину;

- разнообразие процессов и явлений, вызванных дополнительным тепловыделением в зоне перестройки и разрыва связей, может привести к изменению характера разрушения металла;

- значительные по величине тепловые импульсы, передаваемые материалу в результате рекомбинации ионов водорода, способны вызвать мощную волну напряжений, и привести к образованию в материале сетки микротрещин и их развитию.

Таким образом, термическая активация (кроме возможного оплавления металла) так же, как и механические напряжения способ-

ствуется образованию избытка дефектов и мелких субмикротрещин и создаёт общий благоприятный фон для разрушения. Не менее важно, что хотя высокая температура ослабляет тела, она же, в определённых условиях, может способствовать релаксационным и диффузионным процессам, которые «залечивают» нарушения в теле.

Эффективность механоплазменной обработки подтверждается результатами промышленных испытаний при формообразовании металла всеми видами механического воздействия, как резанием, так и давлением, при шлифовании и полировании силикатных стёкол, резании полупроводниковых материалов, бурении горных пород, измельчении силикатных систем и др.

Результаты промышленных испытаний показали необычайно высокую эффективность механоплазменной обработки, позволяющей существенно интенсифицировать процесс изготовления изделий при повышении качества обработанных поверхностей и достижения высокого экономического результата [1].

Приведём некоторые данные о резании стали с различными физико-механическими свойствами инструмента, режущая часть которого изготавливалась из быстрорежущей стали, твёрдого сплава и минералокерамики. Было установлено, что суммарные энергетические затраты с увеличением параметров резания снижаются до 40%, износостойкость инструмента увеличивается более чем на порядок. При этом выдерживалась заданная точность, улучшалась чистота обработанной поверхности, повышалась эксплуатационная долговечность изделий. Так, предел усталости стали 9ХС на воздухе после механоплазменной обработки увеличился на 20%, а предел коррозионной усталости на 40%.

Максимальная скорость, при которой возможно стабильное волочение проволоки из стали 08Х18Н9Т через алмазные волокна на заводской смазке при переходе волочения с диаметра 33 мкм на 31 мкм ограничивается 8 м/с, тогда как при механоплазменном процессе волочение осуществляется при скорости 32 м/с.

Результаты работы на 5 буровых установках (буровой станок ЗНФ-650 М, число оборотов бурового инструмента 780 мин^{-1} , диаметр алмазной коронки 59 мм) при бурении горных пород X–XII категорий твёрдости показали, что средний удельный расход мощности при бурении на буровом растворе из смеси гудронов равен 5,42 кВт·ч/м, тогда как при реализации механоплазменного эффекта расход мощности снизился до 2,77 кВт·ч/м, проходка на одну коронку возросла с 25 м до 32 м, а удельный расход алмазов снизился на 10%.

5. ВЫВОДЫ

1. Сформулирована проблема неадекватности физико-химических

процессов, сопутствующих разрушению металла при его механической обработке в условиях обратимого (адсорбционного) взаимодействия тела со средой, общепринятому адсорбционному механизму.

2. Создана модель активации исходной среды в момент разрушения твёрдого тела и показано её соответствие основным экспериментальным данным. Установлена решающая роль образования трещин, как фактора, инициирующего низкотемпературные химические реакции в среде.

3. Взаимодействие углеводородной среды с деформируемым металлом и физико-химические процессы, возникающие в момент разрушения тела, обуславливают переход окружающей среды в новое фазовое состояние — водородную плазму. Ионизаторами среды являются электрически активная реальная вновь образующаяся структура тела, экзоэлектронная эмиссия, электроискровые разряды при разрыве контактов инструмента с заготовкой и температура.

4. Ускоренная диффузия протона в микрообласти, прилегающей к вершине трещины, обусловлена следующими как кратковременными, так и достаточно длительными электрическими процессами, протекающими при разрушении металла: термоэлектрическим током, создающим эффект электронного «ветра» при амбиполярной диффузии свободных электронов и протонов, а также отрицательным объёмным электрическим зарядом заготовки и отрицательным локальным зарядом в зоне преодоления сцепления между атомами.

5. Непосредственной причиной облегчения процессов деформации и разрушения является большой тепловой эффект, образующийся в результате рекомбинации ионов водорода вследствие их контактных взаимодействий с электрически активной реальной структурой деформируемого металла.

6. С повышением температуры на более ранней стадии приводятся в действие источники дислокаций, снимаются препятствия (структурное упрочнение и деформационное упрочнение в кристалле), вызывающие торможение дислокаций, приводятся в действие источники дислокаций с более высоким напряжением старта, а скорость скольжения дислокаций возрастает до тех пор, пока скорость введения в действие новых источников дислокаций не станет достаточной для локального плавления тела и потери им устойчивости.

7. Показана возможность использования специальных сред для создания эффективных технологий обработки деталей машин с одновременным повышением их эксплуатационной долговечности.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Сошко, В. А. Сошко, *Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла* (Херсон: Олди-плюс: 2008).
2. В. А. Сошко, А. И. Сошко, *Механохимическая обработка металлов*

- (Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing: 2015).
3. В. А. Сошко, И. П. Симинченко, В. С. Ляшков, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 12: 1701 (2014).
 4. В. А. Сошко, И. П. Симинченко, *Физико-химическая механика материалов*, № 2: 72 (2015).
 5. А. М. Занин, Д. П. Кирюхин, И. М. Баркалов, В. И. Гольдманский, *Письма в ЖЭТФ*, **33**, вып. 6: 336 (1981).
 6. И. Дж. А. Армарега, Р. Х. Браун, *Обработка металлов резанием* (Москва: Машиностроение: 1977).
 7. Б. В. Новожилов, *Волновые процессы в химической физике* (Москва: Знание: 1986).
 8. Н. Н. Семёнов, *Развитие теории цепных реакций и теплового самовоспламенения* (Москва: Знание: 1969).
 9. А. С. Ахматов, *Молекулярная физика граничного трения* (Москва: ГИФМЛ: 1963).
 10. Т. Н. Трофимов, *Курс физики* (Москва: Высшая школа: 2000).
 11. Г. Алефельд, И. Фелькль, *Водород в металлах* (Москва: Мир: 1981).
 12. В. М. Финкель, *Физика разрушения* (Москва: Металлургия: 1970).
 13. Ф. Макклиток, А. Аргон, *Деформация и разрушение материалов* (Москва: Мир: 1970).
 14. В. Н. Подураев, *Резание труднообрабатываемых материалов* (Москва: Высшая школа: 1974).
 15. В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадёров, В. И. Трефилов, *Физические основы электротермического упрочнения стали* (Киев: Наукова думка: 1973).
 16. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, *Электрический пробой и разрушение твёрдых диэлектриков* (Москва: Высшая школа: 1966).
 17. В. И. Шаповалов, *Легирование водородом* (Днепропетровск: Журфонд: 2013).

REFERENCES

1. A. I. Soshko and V. A. Soshko, *Smazochno-Okhlazhdayushchie Sredstva v Mekhanicheskoy Obrabotke Metalla* [Refrigerants in Mechanical Treatment of Metal] (Kherson: Oldi-Plyus: 2008) (in Russian).
2. V. A. Soshko and A. I. Soshko, *Mekhanokhimicheskaya Obrabotka Metallov* [Mechanochemical Treatment of Metals] (Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing: 2015) (in Russian).
3. V. O. Soshko, I. P. Siminchenko, and V. S. Lyashkov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 12: 1701 (2014) (in Russian).
4. V. A. Soshko and I. P. Siminchenko, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, No. 2: 72 (2015) (in Russian).
5. A. M. Zanin, D. P. Kiryukhin, I. M. Barkalov, and V. I. Goldanskiy, *Pisma v ZhETF*, **33**, Iss. 6: 336 (1981) (in Russian).
6. I. J. A. Armarego and R. H. Braun, *Obrabotka Metallov Rezaniem* [Treatment of Metal by Cutting] (Moscow: Mashinostroenie: 1977) (Russian translation).
7. B. V. Novozhilov, *Volnovye Protsessy v Khimicheskoy Fizike* [Wave Processes in Chemical Physics] (Moscow: Znanie: 1986) (in Russian).

8. N. N. Semenov, *Razvitie Teorii Tsepnykh Reaktsiy i Teplovogo Samovosplamneniya* [Development of Theory of Chain Reactions and Thermal Autoignition] (Moscow: Znanie: 1969) (in Russian).
9. A. S. Akhmatov, *Molekulyarnaya Fizika Granichnogo Treniya* [Molecular Physics of Boundary Friction] (Moscow: GIFML: 1963) (in Russian).
10. T. N. Trofimov, *Kurs Fiziki* [Physics Course] (Moscow: Vysshaya Shkola: 2000) (in Russian).
11. G. Alefeld and J. Völkl, *Vodorod v Metallakh* [Hydrogen in Metals] (Moscow: Mir: 1981) (Russian translation).
12. V. M. Finkel', *Fizika Razrusheniya* [Physics of Failure] (Moscow: Metallurgiya: 1970) (in Russian).
13. F. Makklitok and A. Argon, *Deformatsiya i Razrushenie Materialov* [Deformation and Failure of Materials] (Moscow: Mir: 1970) (Russian translation).
14. V. N. Poduraev, *Rezanie Trudnoobrabatываемых Materialov* [Cutting of Hard Materials] (Moscow: Vysshaya Shkola: 1974) (in Russian).
15. V. N. Gridnev, Yu. Ya. Meshkov, S. P. Oshkaderov, and V. I. Trefilov, *Fizicheskie Osnovy Elektrotermicheskogo Uprochneniya Stali* [Basic Physics of Electroheat Hardening of Steel] (Kiev: Naukova Dumka: 1973) (in Russian).
16. A. A. Vorob'ev and G. A. Vorob'ev, *Elektricheskiy Proboi i Razrushenie Tverdykh Dielektrikov* [Electrical Breakdown and Failure of Solid Dielectrics] (Kiev: Vysshaya Shkola: 1966) (in Russian).
17. V. I. Shapovalov, *Legirovanie Vodorodom* [Alloyage with Hydrogen] (Dnepropetrovsk: Zhurfond: 2013) (in Russian).