

PACSnumbers: 34.35.+a, 52.77.-j, 81.15.Jj, 81.16.-c, 81.20.Hy, 81.20.Ka, 81.40.Np, 81.65.Cf

## **Механоплазменная обработка металла**

А. И. Сошко, В. А. Сошко, И. П. Симинченко

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

Сформулирована необходимость решения новых задач в нанометровом и «протонном» масштабах, связанных с проблемой разрушения твёрдого тела в условиях обратимого (адсорбционного) взаимодействия тела со средой. Показано, что в основу представлений о физической природе возникновения физико-механических свойств твёрдого тела под влиянием среды положены общие термодинамические представления о стремлении свободной энергии системы к уменьшению вследствие адсорбции среды. Такие макроскопические представления, построенные без учёта микроскопических явлений, вызывают неадекватное понимание и толкование механизма влияния среды. В работе обсуждается решающая роль трещины как фактора, инициирующего в момент разрушения различные физические процессы и явления, имеющие квантовую природу, которые инициируют не только многоэтапные химические превращения исходной поверхностно-активной среды вплоть до образования водородной плазмы, но и обеспечивают своевременное поступление протонов в область пластической деформации перед остриём трещины. Выявлены условия, способствующие инициированию и самоускорению химических превращений среды в зоне разрушения, а также проявлению положительной обратной связи между механическими и химическими процессами. Предложен новый способ формообразования деталей путём механоплазменной обработки (МПО) металла.

Сформульовано необхідність вирішення нових завдань у нанометровому та «протонному» масштабах, пов'язаних з проблемою руйнування твердого тіла в умовах оборотної (адсорбційної) взаємодії тіла з середовищем. Показано, що в основу уявлень про фізичну природу виникнення фізико-механічних властивостей твердого тіла під впливом середовища покладено загальні термодинамічні уявлення про прагнення вільної енергії системи до зменшення внаслідок адсорбції середовища. Такі макроскопічні уявлення, побудовані без урахування мікроскопічних явищ, викликають неадекватне розуміння та тлумачення механізму впливу середовища. В роботі обговорюється вирішальна роль тріщини

як чинника, що ініціює в момент руйнування різні фізичні процеси й явища, які мають квантову природу та ініціюють не тільки багатоступені хемічні перетворення вихідного поверхнево-активного середовища аж до утворення водневої плазми, але й забезпечують своєчасне надходження протонів у область пластичної деформації перед вістрям тріщини. Виявлено умови, що сприяють ініціюванню та самопришвидженню хемічних перетворень середовища в зоні руйнування, а також прояву позитивного зворотнього зв'язку між механічними та хемічними процесами. Запропоновано новий спосіб формоутворення деталей шляхом механоплазменного оброблення (МПО) металу.

The necessity of solving new problems at the nanometre and 'proton' scales associated with the problem of solid-body destruction under conditions of reversible (adsorptive) interaction of the body with the medium is formulated. As shown, the general concepts of the physical nature of the appearance of physicomachanical properties of a solid under the influence of the medium are general thermodynamic concepts of the tendency of the free energy of a system to decrease due to the adsorption of the medium. Such macroscopic representations constructed without taking into account microscopic phenomena cause inadequate understanding and interpretation of the mechanism of environmental influence. This work discusses the decisive role of the crack as a factor initiating, at the time of destruction, various physical processes and phenomena of a quantum nature, which initiate not only multi-stage chemical transformations of the initial surface-active medium up to the formation of a hydrogen plasma, but also provide a prompt supply of protons into the region of plastic deformation in front of the crack tip. Conditions promoting the initiation and self-acceleration of chemical transformations of the medium within the destruction zone as well as the manifestation of a positive feedback between mechanical and chemical processes are revealed. A new method for forming structural parts by means mechanical-plasma treatment (MPT) of a metal is proposed.

**Ключевые слова:** обработка, деформация, трещина, разрушение, активация, водород, ионизация, протон, плазма, диффузия, ловушка, структура, наноматериалы, прочность.

**Ключові слова:** оброблення, деформація, тріщина, руйнування, активація, водень, йонізація, протон, плазма, дифузія, пастка, структура, наноматеріали, міцність.

**Key words:** treatment, deformation, crack, fracture, activation, hydrogen, ionization, proton, plasma, diffusion, trap, structure, nanomaterials, strength.

*(Получено 23 января 2018 г.; после доработки — 27 апреля 2018 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди многообразия форм проявления влияния жидких и газо-

вых сред на различные свойства твёрдых тел выделяются такие как снижение механических свойств и интенсификация механической обработки тела в условиях его обратимого (адсорбционного) взаимодействия со средой. В основу физической природы данной группы явлений положены общие термодинамические представления о стремлении свободной энергии системы к уменьшению, что проявляется в виде понижения величины поверхностного натяжения твёрдого тела. Отсюда вытекает общепринятая точка зрения о снижении механических свойств твёрдых тел в результате адсорбции поверхностно-активных сред как о величине, пропорциональной уменьшению поверхностной энергии тела вследствие его взаимодействия со средой (эффект Ребиндера) [1–4].

Вместе с тем, совокупность экспериментальных данных показывает, что эта общая термодинамическая закономерность, как и адсорбционный эффект, в различных взаимодействующих системах проявляется по-разному. Например, при механической обработке новых видов материалов с особыми физико-механическими свойствами в смазочно-охлаждающих технологических средствах (СОТС) роль адсорбционного понижения прочности настолько незначительна, что в общем балансе энергетических затрат этот эффект приближается к нулю [5]. Можно привести ряд примеров, когда адсорбционная активность сред практически одинакова, а регистрируемые макропоказатели их активности (при прочих равных условиях) значительно отличаются [6].

Таким образом, с одной стороны, имеется обширная доказательная база, иллюстрирующая заметное изменение макроскопических свойств материала вследствие влияния среды, а с другой, общепринятый механизм этого эффекта как результат понижения поверхностной энергии тела вследствие обратимой адсорбции среды не всегда адекватен уровню снижения его механических свойств [7].

Вопрос о наличии эффекта адсорбционного понижения прочности никто не ставит под сомнение. Вместе с тем, анализ обширных результатов применения СОТС в механической обработке твёрдых тел, и особенно упруго-вязких, к каковым относится основная группа обрабатываемых резанием металлов, а также экспериментальные данные по исследованию данной проблемы свидетельствуют о том, что адсорбционный эффект облегчения деформации металла в процессе его разрушения не может играть основную роль в улучшении их обрабатываемости [6, 8]. Поэтому попытки радикального повышения эффективности СОТС на базе старых классических моделей, неадекватно описывающие механизм разрушения материала в условиях влияния среды, перестают удовлетворять промышленность.

## 2. ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исходя из изложенного, заключением, которое необходимо сделать в настоящий момент, является вывод о том, что методы создания и производства СОТС, продолжающие до настоящего времени строиться на старых общепринятых принципах адсорбционной концепции понижения прочности, подошли к своему естественному техническому и экономическому барьеру, в связи с чем эффективность создаваемых смазочно-охлаждающих жидкостей повышается незначительно, зато экономические затраты возрастают многократно.

Проведённые в последнее время исследования показали, что в обработанном резанием материале и в стружке в любых водородосодержащих средах всегда содержится водород. Кстати, водород регистрируется в материале не только после его механической обработки, но и при любых других видах деформации и разрушения в органических средах и даже в воде. Это означает, что наличие водорода в объёме обработанного металла возможно только в связи с химическими превращениями исходной водородсодержащей среды, на последнем этапе которых образуется водород в активных формах. Образование ионизированного водорода не вызывает сомнения, поскольку при огромной скорости деформации металла при резании своевременно поступать непосредственно в электроактивную зону, где преодолеваются силы сцепления между атомами материала, могут только электроактивные частицы водорода. В связи с этим, имеются все основания полагать, что решающая роль в облегчении процессов деформации и разрушения материала в поверхностно-активных средах принадлежит водороду в протонном состоянии.

Полученные экспериментальные данные, свидетельствующие об участии водорода в процессе разрушения, привели не только к более полному пониманию механизма процессов разрушения, но также к обоснованию новых путей механической обработки твёрдых тел. В частности, на их основе создана новая технология формообразования стальных деталей, объединившая механический процесс с упрочняющей технологией. В этой технологии используются уникальные свойства объектов нанометрового и «протонного» масштабов, которые радикально отличаются от свойств свободных атомов или молекул.

Таким образом, становится ясно, что одновременно с адсорбционным понижением прочности металла при его обработке в СОТС идут иные, незаметные на макроуровне процессы, играющие основную роль в эффектах, наблюдаемых от применения СОТС в процессах механической обработки.

Тот факт, что поверхностно-активная среда превращается в ра-

дикально-активную, свидетельствует о том, что ультрамикроскопическая область материала, где происходят вскрытие новых поверхностей и деформация прилежащего слоя, представляет собой реакционную зону, в которой образуется наноматериал. С большой вероятностью полагалось, что именно здесь, в полости трещины, протекающие в момент её роста различные физико-химические процессы и явления способны вызвать разложение углеводородов, а затем и внутримолекулярные перегруппировки атомов с образованием слабоионизованного газа, т.е. водородной плазмы. В дальнейшем контактные взаимодействия электрически активных частиц водорода с образующейся в ходе механического процесса новой электрически активной структурой материала способствуют облегчению процесса деформации и разрушения. При этом существенной особенностью синтеза наноструктур должно быть не только инициирование, но и самоактивация химических превращений в процессе роста трещины, то есть в этом случае должна осуществляться положительная обратная связь между механическим и химическим процессами.

Следует отметить, что изучение механизма взаимодействия водорода с металлом в момент его разрушения имеет огромное значение для практики и представляет исключительный научный интерес, поскольку приводит не только к более полному пониманию механизма процесса разрушения при совокупном влиянии механических факторов, состава и структуры исследуемого твёрдого тела и температуры. Как оказалось, такие исследования позволяют также выявить скрытые возможности создания комплексных процессов оптимального формообразования деталей, сочетающихся с упрочняющей технологий и экономичностью технологического процесса.

### **3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

В рамках данной проблемы в первой части работы исследования сконцентрированы на изучении процессов и явлений, вызывающих превращения исходной поверхностно-активной среды в радикально активную водородную плазму. Вторая часть посвящена изучению новой образовавшейся системы металл–среда, в которой протекают контактные взаимодействия образовавшихся электрически активных частиц водорода с электрически активной структурой металла, возникающей в момент его разрушения. Именно такие взаимодействия являются основной причиной облегчения процессов деформации и разрушения в связи с реализацией механоплазменного эффекта.

Здесь хотелось бы подчеркнуть, что познание законов такого исключительно сложного по своей многоплановости и специфиче-

ским условиям протекания процесса чрезвычайно затруднено, поскольку во взаимодействующей системе постоянно изменяются входные параметры: поле температур, давлений, концентраций, геометрия системы. В свою очередь, на процессы, связанные с изменением химического состава среды, большое влияние оказывают физические факторы: теплоотвод через поверхность трещины, подвод реагентов, эффективность действия ионизаторов, что связано с режимами обработки, химическим составом деформируемого тела и его структурным состоянием и т.п.

В связи с этим был выделен ряд проблем, решение которых, хотя бы на качественном уровне, может дать возможность продвинуться в данном вопросе в нужном направлении. Большинство остальных проблемных вопросов относится к сфере современной физики строения вещества и других областей науки и требует отдельных специальных исследований. Вместе с тем, уже сейчас достижения в этих смежных областях науки позволяют сделать следующие допущения, на которых базируется понимание рассматриваемых в статье изменённых свойств вещества через взаимодействие его микроскопических составных частей с твёрдым телом.

1. Общепринятое описание деформаций в твёрдых телах (растяжение, сжатие, сдвиг) базируется на макроскопическом уравнении состояния, которое связывает параметры этих деформаций с микроскопическими взаимодействиями между атомами, из которых состоит вещество. Однако такой подход является чисто статическим, поскольку предполагалось, что тело находится в равновесии с приложенными к нему внешними силами. Если же, как в случае резания, внешняя сила прикладывается очень быстро, то в материале возникает движущий импульс или волна деформации, способные перемещаться внутри тела. Если эта внешняя сила периодически изменяется со временем, то в материале будет распространяться периодическая волна [8]. Подобный процесс наблюдается в зоне стружкообразования; в ней непрерывно циклически изменяются напряжение сдвига и степень пластической деформации по схеме «максимум (вызывающий отделение металла)–ноль–максимум». Таким образом, полагается, что в локализованной области материала в микрообъёмах, расположенных по линии среза, периодически возникает импульс давления, вызывающий распространение волн сжатия. Аналогично этому, возникают тепловые волны вследствие рекомбинации протонов на поверхностях зоны стружкообразования и в объёме материала в ловушках водорода.

2. Впереди режущей кромки инструмента в процессе резания в узком канале и в микрообъёме материала выделяется значительная механическая и тепловая энергии при очень большой кон-

центрации мощности. В связи с этим наблюдается внешняя аналогия нарастания напряжений, как и в теле при взрыве заряда взрывчатого вещества или как при электрическом пробое диэлектрика. После прохождения максимума волн в материале достигается максимум деформации, и появляются трещины как результат последовательных смещений отделённых участков кристаллической решётки по плоскостям скольжения слоёв материала.

3. Стружка не контактирует с передней поверхностью инструмента вблизи его вершины, а результирующая сила прикладывается в центре контактной площадки. Перед клином инструмента существует узкая щель шириной примерно  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  см, сопрягающаяся с трещиной разрушения.

### 3.1. Формирование наноматериала и элементарных частиц в зоне стружкообразования

То обстоятельство, что наблюдаемые эффекты не вызваны обратимым взаимодействием тела со средой, с полной очевидностью вытекает уже из результатов проведённых первых экспериментальных исследований. Среди них особое значение имеет установленный факт наличия водорода в разрушенных образцах стали после их испытаний на растяжение в углеводородных поверхностно-активных средах, так же как и в стружке, и в обработанной поверхности после механической обработки резанием в таких же средах [5].

Факт проникновения водорода внутрь металла был подтверждён также в эксперименте, когда образец железа армко деформировался в среде  $D_2O$ .

Использование меченой воды было обусловлено необходимостью исключить возможную регистрацию «постороннего» водорода, присутствующего в исходном образце или привнесённого на его поверхности в результате адсорбции атмосферной влаги. В опытах образец кубической формы ( $l = 3$  мм) помещался между плоскопараллельными поверхностями внутри капли  $D_2O$ . После приложения нагрузки (20 тонн) образец сжимался до толщины 0,5 мм (относительная деформация сжатия составила 80%). Затем, путём шлифования, с обеих сторон образца удалялся слой толщиной 30 мкм с целью устранения поверхностных дейтерийсодержащих соединений. В дальнейшем образец помещался в вакуумный объём с одновременной масс-спектрометрической регистрацией выделяющегося дейтерия в процессе его нагрева. В спектре обнаруживался пик выделения дейтерия с максимумом около 540 К, что свидетельствовало о разрушении молекулы  $D_2O$  с образованием дейтерия и его диффузии в железо в процессе деформации. Аналогичные результаты были получены при сверле-

нии в  $D_2O$  стали-20 [6].

В связи с полученными данными полагалось, что в зоне разрушения металла происходят химические превращения исходной углеводородной поверхностно-активной среды с образованием активных форм водорода — химического элемента, действие которого на металл отличается большими изменениями его физико-механических свойств. Этот вывод имел огромное практическое значение, ибо отсюда следовали непосредственные рекомендации искать эффективные присадки к СОТС не среди поверхностно-активных веществ, обладающих высокой адсорбционной способностью, а среди полимерных соединений, дающих, как известно, в результате термодеструкции большой выход смеси газообразных веществ, содержащих водород в активных формах [5].

Действительно, в результате промышленных испытаний было установлено [6], что добавление в СОТС 1,0–1,5% полимера радикально снижало энергосиловые параметры механической обработки, многократно повышало износостойкость инструмента, улучшало качество обработанной поверхности и эксплуатационные характеристики деталей.

Вместе с тем, несмотря на полученные на первом этапе работы разносторонние и весьма обнадеживающие результаты, подтверждающие гипотезу, она, безусловно, нуждается в дальнейших исследованиях.

Следует отметить, что, хотя введённые в металл протоны и представляют собой простейшие химические элементы, но, несмотря на это, до сих пор количественной теории такой системы практически не существует. Поэтому здесь при рассмотрении контактных взаимодействий водорода с металлом и их влияния на физико-механические свойства стали будем идти феноменологическим путём.

Некоторые представления о физико-химической природе превращения исходной поверхностно-активной среды в радикально-активную в зоне разрушения изложены в работах [5–7]. В цитируемых исследованиях, также как и в данной работе, влияние среды на процесс разрушения металла рассматривается происходящим в исключительно сложных условиях, которые создаются при механической обработке тела резанием. В этом случае особенность процессов деформации и разрушения вызвана огромной скоростью деформирования ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ ) и большим удельным давлением инструмента на обрабатываемый материал ( $3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ ), что практически исключает возможность своевременного поступления поверхностно-активной среды в вершину трещины, а значит, и снижает вероятность изменения прочности за счёт адсорбционного эффекта. Важно также, что при резании металла в зоне разрушения протекают различные физические явления (интенсивное

тепловыделение, термоэлектрические и электрохимические и другие процессы), которые не могут не оказывать влияния на исходные свойства среды, изучение взаимодействия которых представляет одно из интереснейших и малоизученных направлений в этой области.

Резюмируя результаты ранее выполненных работ, укажем на особенности формирования активных форм водорода из среды, содержащей в себе полимерный компонент.

Вообще говоря, реакционная способность функциональной группы не зависит от того, присоединена ли она к полимерной цепи любой длины или находится в составе малой молекулы низкомолекулярного соединения. Качественно этот принцип соблюдается, однако при количественном сравнении отмечены существенные отличия в реакционной способности низко- и высокомолекулярных соединений. Так, если сопоставить энергию отрыва атома водорода в ряду насыщенных углеводородов, то в сравнительных единицах она составит для гептана 11, для полиэтилена — 3, для полиизобутилена — 2 единицы [9]. Это означает, что при температуре, развиваемой в зоне резания, присадка из полиэтилена будет подвергаться деструкции (температура пиролиза полиэтилена составляет 290°C), тогда как её низкомолекулярный аналог может быть разрушен при температуре выше 700°C. В дальнейшем образовавшаяся водородосодержащая газовая смесь может образовывать водород в активных формах на образующихся при разрушении каталитически активных поверхностях, а также под влиянием эмиссии электронов, возникающей при разрыве межатомных связей деформируемого тела [7].

Кроме этого, в отличие от низкомолекулярных аналогов, высокомолекулярные соединения уже в результате первого акта разрыва цепи дают высокую концентрацию реакционно-активных продуктов, вызывающих дальнейшие химические реакции. В этом случае радикалы перемещаются от одной цепи (или фрагмента цепи) к другой путём отрыва атома водорода до тех пор, пока не сблизятся достаточно для того, чтобы произошла их рекомбинация. При этом каждый радикал способен инициировать новую радикальную реакцию, приводящую к разрыву около 10000 полимерных цепей [10]. Образование и накопление активных продуктов и относительно стабильных промежуточных соединений является дополнительным источником роста концентрации новых активных частиц, в результате чего реакция приобретает самоускоряющийся характер, что приводит к образованию газовой смеси с большой концентрацией ионизированного водорода. Об этом свидетельствуют результаты анализа газообразных продуктов в зоне разрушения металла при его резании в СОТС с 1,5% добавкой полиэтилена — полимера, содержащего

только атомы водорода и углерода. Установлено, что в этом случае в зоне разрушения появляются газовая смесь, состоящая в основном из атомарного, молекулярного водорода и активных его форм, а также алифатические предельные углеводороды [6].

Такая газовая смесь непрерывно поступает и накапливается в пространстве, ограниченном вершиной трещины, её «берегами» и режущей кромкой инструмента (рис. 1). Именно в этой реакционной зоне происходит окончательное формирование водородной плазмы. Ионизаторами в этом процессе являются ювенильные каталитически активные поверхности, экзоэлектронная эмиссия и самоускоряющиеся газоразрядные процессы.

Исходя из этого концептуального положения, рассмотрим, как формируются поверхности, образующиеся в момент разрушения твёрдого тела, и каковы физико-химические свойства таких поверхностей.

Сегодня уже не вызывает никакого сомнения, что механическое воздействие, приводящее к росту трещины в твёрдом теле и образованию новых поверхностей, сопровождается вспышкой химического превращения окружающей среды [11]. Фактически, в данном случае, рост трещины играет роль спускового механизма, включающего различные химические реакции. Одни из них инициируются новыми поверхностями. Такая свежесформированная поверхность неидеальна; на ней периодически располагаются точечные дефекты: наиболее электрически активные центры, такие как вершины, ребра и края кристаллов, ступени сколов, поры, а затем менее активные (в соответствии с типом симметрии и пространственным расположением атомов на поверхности). Эти элементы поверхности можно представить как микроэлектроды, способные принимать участие, с одной стороны, в различных физико-химических процессах, а с другой, выступать как действу-

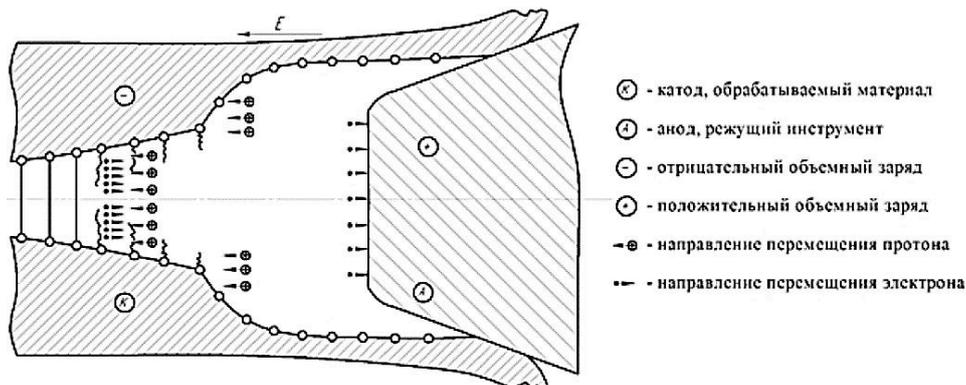


Рис. 1. Схема реакционной зоны.<sup>1</sup>

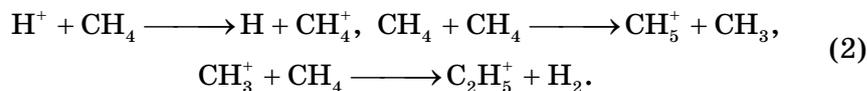
ющие ускоряющие или тормозящие потенциалы при контакте электронов и ионов с поверхностью кристаллов и миграции на ней. Такая мозаичная, каталитически активная поверхность способна активировать идущие на ней химические реакции, иногда даже с нулевой энергией активации. Так, установлен факт катализа водорода на чистой поверхности железа, даже при температуре  $-253^{\circ}\text{C}$  [12].

В связи с этим, обоснованно можно полагать, что при контактных взаимодействиях химических элементов, составляющих газовую смесь, с поверхностями стенок трещины протекает цепь химических превращений этих элементов с образованием на конечном этапе водородосодержащей плазмы, т.е. слабо ионизированного газа, состоящего из положительно и отрицательно заряженных ионов, возбуждённых атомов водорода, электронов.

Способность каталитически активных поверхностей металлов генерировать в объёме активные формы водорода была установлена ещё в ранних работах Ленгмюра. Этот процесс идёт по следующей двухстадийной схеме [12]:



В нашем случае молекулы метана, которые обычно входят в состав газовой смеси, сначала могут превращаться на стенках трещины в молекулярный ион ( $\text{CH}_4^+$ ), а затем в ион метила ( $\text{CH}_3^+$ ) и радикал-атомарный водород [12]. Положительные ионы, обладая более высокой реакционной способностью, чем отрицательные, могут участвовать в передаче заряда:



Таким образом, на каталитической поверхности железа может проходить цепь химических реакций, многие из которых приводят к образованию новых ионов, молекулярных продуктов и свободных радикалов.

Очевидно, что неоднородность поверхности, прежде всего, вызывает взаимодействие с первым слоем элементов газовой смеси, вступающих с ней в контакт. Однако, поскольку на поверхности выходит большое количество дефектов решётки (вакансии, дислокации, границы зёрен, субзёрен и фаз) с размерами от нескольких ангстрем до  $100 \text{ \AA}$ , то на них происходит адсорбция следующих слоёв газа. Кроме этого, такие дефекты, по видимому, можно моделировать в виде каналов, которые служат путями преимущественно диффузии водорода.

Реакционная зона обладает ещё одним чрезвычайно важным

свойством. Исключительность этого явления состоит в том, что на контактных поверхностях инструмента с обрабатываемым материалом в зоне стружкообразования некоторые электроны в процессе пластической деформации и трения приобретают кинетическую энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера их отделения от границы металла, что приводит к возникновению термотока [13]. Поскольку основные носители тока, — электроны, — диффундируют из нагретой области (лезвия инструмента) в холодную (обрабатываемый металл), то обрабатываемый металл будет обогащаться носителями заряда, — электронами, — и приобретать отрицательный объёмный заряд, а инструмент, обедняясь электронами, заряжается положительно. Этот процесс протекает непрерывно, т.е. непрерывно происходит «перекачивание» электронов в одном направлении от инструмента в обрабатываемый материал, и в системе непрерывно протекает электрический ток. В связи с этим в реакторной зоне произойдёт раздел направления движения потока заряженных частиц водорода: частица отрицательного электрического заряда будет притягиваться инструментом. Подобным же образом протоны будут двигаться в направлении поверхности вершины трещины.

После прохождения через поверхность водород в протонном состоянии увлекается электронами проводимости обрабатываемого металла, движущимися в электрическом поле с большой скоростью. Увлечение ионов электронами проводимости настолько велико, что положительно заряженные ионы начинают двигаться, как правило, в сторону анода, против поля, подобно частицам с большим отрицательным зарядом [14, 15]. Этот процесс, называемый эффектом электронного «ветра», обеспечивает скорость перемещения протонов вдоль срезаемого слоя со скоростью, превышающей скорость роста трещины.

И, наконец, в образовании водородной плазмы в реакторной области значительная роль принадлежит экзоэлектронной эмиссии. В этом случае электроны вылетают из устья трещины с большой интенсивностью ( $6 \cdot 10^3$  импульсов в минуту) и энергией ( $10^2$  эВ) [16, 17], превышающей энергию ионизации атома водорода (13,595 эВ). Это означает, что в реакторной зоне создаются условия для ударной ионизации молекул водорода и остаточных газовых углеводородов (рис. 2).

Электроны, сталкиваясь с нейтральными молекулами и нейтральными атомами, ионизируют их, в результате чего образуются вторичные электроны и положительные ионы (процесс 1). Положительные ионы будут двигаться по направлению к катоду, а электроны — к аноду. После соударения электроны будут набирать энергию, и при следующем соударении появятся уже четыре электрона и четыре иона (процесс 2). После третьей иони-

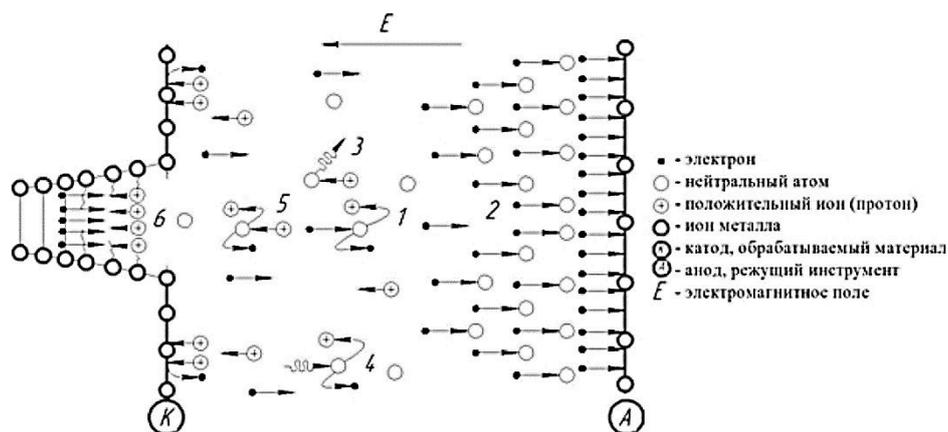
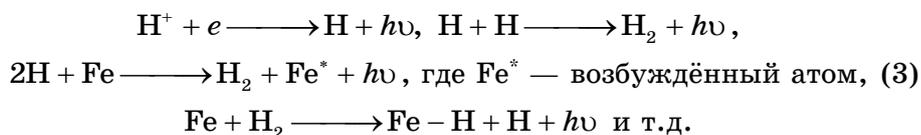


Рис. 2. Модель ударной ионизации водорода.<sup>2</sup>

зации их будет восемь, после четвертой — шестнадцать и т.д. Поэтому общее число электронов и ионов будет возрастать лавинообразно по мере продвижения электронов к аноду. Одновременно с этим, положительные ионы, сталкиваясь с нейтральными атомами, переводят их в возбуждённое состояние, а их переход в нормальное состояние сопровождается испусканием фотона (процесс 3), который, в свою очередь, может быть поглощён нейтральным атомом и ионизировать его (процесс 4). В том случае, если положительные ионы под действием электрического поля приобретут энергию, достаточную для ионизации атома водорода, возможен процесс 5 [18, 19]. Следовательно, в результате ударной ионизации, химических реакций на каталитически активных поверхностях трещины и самоускоряющихся реакций в реакционной зоне с большой скоростью образуется высокая концентрация водорода в ионизированном состоянии.

В дальнейшем, под действием электрического поля системы, а также отрицательного заряда, сконцентрированного в вершине трещины, поток протонов, несущих положительный электрический заряд, через узкую щель устремляется к вершине трещины (процесс 6). При подлёте к вершине трещины поток протонов разделяется на две части. Одна часть протонов сталкивается с потоком экзоэлектронной эмиссии и в результате взаимодействия с электронами рекомбинирует с выделением тепловой энергии (от 60 до 120 ккал/моль). Вторая часть протонов, пройдя через поверхность устья трещины, свободно транс- и межкристаллитно перемещается вдоль срезаемого слоя благодаря эффекту электронного «ветра». При этом некоторые диффундирующие протоны захватываются ловушками водорода, где также рекомбинируют в связи со взаимодействиями с электронами проводимости,

и при этом высвобождается энергия. Процессы рекомбинации протонов, как в первом, так и во втором случае, протекают по следующей схеме:



При этом процессы, протекающие от возникновения первичных ионов до образования новых, а также молекулярных продуктов и свободных радикалов, завершаются всего за  $10^{-5}$  сек. [20].

Обоснованно можно полагать, что такая газовая смесь состоит из электронов, однократно заряженных положительных ионов и нейтральных молекул водорода, многократно заряженных ионов (молекулы, от которых оторвано более одного электрона), отрицательно заряженных молекулярных ионов, нейтральных молекул, захватившие электрон, атомных и молекулярных ионов, а также частично разорванных фрагментов углеводородной цепи полимера. В дальнейшем, в связи с каталитическими реакциями химических элементов газовой смеси на новых поверхностях реакторной зоны, а также «ударной» ионизацией, концентрация электрически заряженных частиц водорода в реакторной зоне будет возрастать с образованием водородной плазмы.

Отметим, что, строго говоря, под плазмой следует понимать только сильно ионизированный газ, который может образовываться в результате электрон-ионного взаимодействия. По-видимому, в реакторной зоне параллельно идут два процесса: один — с образованием сильно ионизированного газа, а второй — с образованием слабо ионизированного газа, когда соударение электронов происходит с нейтральными атомами водорода. В связи с этим образующуюся смесь электрически заряженных частиц водорода только условно можно назвать плазмой.

Представления о физико-химической природе активации исходной среды подтверждаются не только современными теоретическими работами, но и практическим результатом их использования. Так, например, если ввести в поток ионизированного водорода металлическую пластинку, то её поверхность быстро расплавится и образуется сварочная ванна. В этом случае, по измерениям и теоретическим расчётам температура пламени составляет около  $3700^\circ\text{C}$ . [21] На этом принципе разработан также промышленный способ сварки, которая носит название «атомно-водородная сварка». Известна также технология плазменной резки металла, когда узкий поток ионизированного водорода направляется на металл, расплавляя его в тонком слое.

### 3.2. О взаимодействии протонов с реальной структурой

Как уже отмечалось, в срезаемом слое часть протонов будет свободно перемещаться через кристаллические решётки, а другая часть захватывается ловушками, в основном, точечными, линейными, поверхностными и объёмными дефектами кристаллической решётки [27]. Взаимодействие в ловушках протонов между собой и с дефектами кристаллической решётки обуславливает многие поразительные явления, которые, в свою очередь, изменяя физические и химические свойства металла, приводят к большим изменениям самой его физической природы.

Не вдаваясь в детализацию природы проявления этих процессов и явлений, происходящих в срезаемом объёме материала, отметим только те из них, которые по нашему мнению в наибольшей степени влияют на прочность материала. К их числу следует отнести: реакции, протекающие с выделением тепловой энергии, реакции образующие химические соединения и реакции взаимодействия протонов с линейными дефектами решётки.

Реакции водорода в ловушках происходят по рассмотренной схеме (3), а реакции второго типа идут в связи со взаимодействием водорода с постоянными примесями в металле и легирующими элементами. Так, установлено [23], что водород с примесями может образовывать соединения  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{P}_2\text{H}_4$  и др. Кроме этого, он может взаимодействовать с углеродом, находящимся в растворе ( $4\text{H} + \text{C} \longrightarrow \text{CH}_4$ ) и с углеродом в составе карбидов, разрушая их ( $4\text{H} + \text{Fe}_3\text{C} = 3\text{Fe} + \text{CH}_4$ ). При этом образуется тепловой эффект, составляющий соответственно 20 и 34 ккал/моль. Причём реакция водорода с углеродом может происходить не только при высоких температурах, но и при низких на каталитически активных поверхностях металла.

Присутствующие в стали неметаллические включения (силикаты, глинозём, кремнезём, нитриды титана) также могут быть ловушками водорода с последующим образованием коллекторов.

В конечном счёте, взаимодействия водорода с постоянными примесями, легирующими элементами и неметаллическими включениями приводят к образованию концентраторов напряжений и значительно повышают склонность стали к водородному охрупчиванию [32]. Относительно химического взаимодействия водорода с элементами VIII группы периодической системы, — железом, кобальтом и никелем, — в литературе имеются противоречивые данные, что вызывает сомнения в реальном существовании гидридов этих элементов.

Таким образом, при полёте потока протонов к поверхностям острия реакционной щели происходит разделение лавины электроактивных частиц водорода. Одна часть захватывается поверх-

ностными ловушками, где происходит рекомбинация протонов в молекулы с образованием водорода в атомарном состоянии и при этом высвобождается тепловая энергия. Молекулы на поверхности остаются инертным компонентом, а атомы, отдав свои электроны в обобщённый электронный комплекс металла, превращаются в ионы водорода — протоны и внедряются в решётку металла.

На поверхности могут развиваться два предельных варианта процессов, вызванных контактными взаимодействиями в системе металл–среда. При высокой плотности и скорости потока температура на поверхности может превышать температуру плавления металла, и он оплавляється. При незначительной концентрации протонов в потоке температура поверхности не достигает температуры плавления металла. В этом случае влияние температуры будет проявляться на скорости зарождения трещины, её докритического и закритического развития в прилежащих к поверхности слоях.

Другая часть потока протонов после прохождения поверхностного слоя и перемещения вглубь металла также разделяется на две составляющие. Одна часть будет свободно перемещаться через кристаллические решётки, а другая — захватываться объёмными ловушками.

Перемещающиеся к аноду с большой скоростью протоны будут оказывать влияние на все стадии разрушения материала (зарождение, подрастание и лавинный рост трещины). Существенное влияние на возможность захвата протонов оказывает знак деформации, поскольку водород имеет тенденцию диффундировать к местам избыточной свободной энергии, т.е. к зонам максимальных напряжений растяжения [24]. Это означает, что наибольшее влияние дополнительной тепловой энергии на характер разрушения будет происходить в локальных микрообъёмах у вершины трещины, где материал под действием напряжений становится неоднородным, сначала вследствие границы зёрен, затем субзёрен и, наконец, дислокаций и атомов. В связи с наличием градиентов напряжения, из-за уже имеющейся дефектности строения материала, а также приобретённой в процессе деформации, протоны захватываются и распространяются в стали очень неравномерно. В свою очередь также неравномерно в зоне стружкообразования будет высвобождаться тепловая энергия.

### **3.3. Влияние термомеханической энергии на распространение напряжений**

В связи с изложенным важно отметить специфику образования и распространения напряжений от внешнего механического источ-

ника и внутреннего теплового.

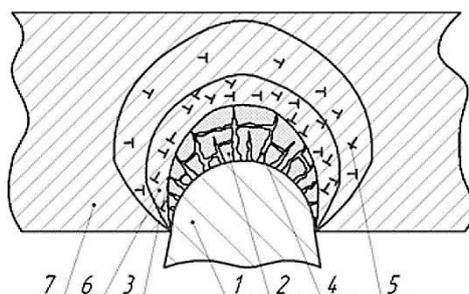
Механические, термические и химические свойства вещества связаны с важнейшими термодинамическими функциями его состояния: внутренней и свободной энергией, термодинамическим потенциалом, энтропией, теплосодержанием. Каждая из перечисленных характеристик определяется строением вещества, и поэтому они связаны друг с другом. Причиной существования этих связей является общность законов взаимодействия между частицами для данной группы кристаллов [25, 26].

О единой природе физических процессов при механическом и термическом разрушении материала свидетельствуют экспериментальные данные [27], что согласуется также с представлениями об ускоряющем разрушении материала вследствие совокупного действия механической нагрузки и температуры [28, 29]. Вместе с тем, по нашему мнению, существует принципиальное различие в механизме влияния тепловой и механической энергий на процесс разрушения.

В предположении, что эксперимент в будущем подтвердит выдвигаемую гипотезу, рассмотрим ситуацию, которая складывается в локализованной области материала перед вершиной реакционной щели, в связи с совокупным действием на эту область механической и тепловой энергий.

Для описания взаимодействия электрически активных частиц с электрически активной реальной структурой металла, обуславливающие конечный результат влияния среды, воспользуемся некоторыми идеями квантовой механики, одна из которых в её наиболее физической форме представляет собой волновую теорию. Согласно этой теории, если внешняя сила прикладывается очень быстро, то в веществе возникает движущий импульс или волна деформации, способные перемещаться внутри вещества, и в случае кристалла волны можно рассматривать как коллективное движение атомов [8].

В отличие от статических механических испытаний при резании наблюдается внешняя аналогия нарастания механических напряжений в теле со взрывом заряда взрывчатого вещества. В том и другом случаях имеется импульс давления инструмента на обрабатываемый металл, создающий в нём разрывающие напряжения, упругую и пластическую деформации [6, 30, 31]. В то же время при резании, в отличие от взрыва, вдавливание клина в материал создаёт действующий на коротком промежутке времени импульс, который оказывает непрерывное давление на материал, вызывая в нём быстро распространяющуюся волну сжатия. После достижения максимума деформации происходит скольжение слоёв материала друг относительно друга, и появляются радиальные трещины. Волна сжатия, подошедшая к свободной поверхности,



**Рис. 3.** Модель распределения трещин после прохождения волны растяжения в зоне растрескивания металла. 1 — режущий инструмент; 2 — зона растрескивания; 3 — радиальные трещины; 4 — кольцевые трещины; 5 — область упругих деформаций; 6 — область пластической деформации; 7 — обрабатываемый материал.<sup>3</sup>

сместит её и произойдёт отделение слоя металла от заготовки. После прохождения волны сжатия, под действием сил упругости смещённые слои, лежащие под срезаемым слоем металла, возвращаются в сторону вершины реакционной щели. Возникающие при этом напряжения растяжения вызывают появление кольцевых трещин (рис. 3).

Схема растрескивания от импульсного высвобождения тепловой энергии аналогична механизму распространения волны напряжения и образования сетки микротрещин в результате вдавливания в тело клина инструмента. Таким образом, волны сжимающих и растягивающих напряжений, распространяемых от острия щелевого пространства и микрообластей материала, где происходят тепловые вспышки, образуют в зоне стружкообразования сложную картину распределения напряжений, вызывающих образование сетки микротрещин.

### 3.4. Некоторые источники повышения обрабатываемости металла при МПО

Образующаяся тепловая энергия при МПО в результате контактных взаимодействий протонов с реальной структурой деформируемого тела играет основную роль в проявлениях облегчения деформации и разрушения металла при его деформировании в поверхностно-активных углеводородных средах (СОТС).

Известно, что силы связей между ионами определяют устойчивость химического соединения, прочность тела при его разрушении. Вследствие этого наблюдается «параллельный ход» термической и механической устойчивостей твёрдого тела. Тем не менее, при наличии внешней общности протекания процессов имеются и

их различия. Например, если испарение твёрдого тела происходит при любой температуре выше абсолютного нуля, а при растяжении тела постоянной силой, хотя напряжение устанавливается со скоростью распространения звука в данном материале, процесс разрушения протекает в продолжение времени, намного большего времени установления нагрузки. Несмотря на это, общность законов взаимодействия между частицами для данной группы кристаллов, многочисленные экспериментальные данные дают основание качественно рассматривать действие на тело механической и тепловой энергий как факторы процесса разрушения, действующие в одном направлении. В связи с этим разрушение материала при резании в СОТС следует рассматривать как механотермический процесс, вызванный совокупным действием на тело внешней механической и внутренней тепловой энергиями. В целом, таким образом, если процесс разрушения металла в инертной среде представить, как состоящий из трёх этапов, — зарождение микротрещины, докритическое подрастание и закритический рост, — то при воздействии поверхностно-активной углеродородной среды (СОТС) происходит ускорение зарождения трещин и облегчение их докритического и закритического роста.

На основе этого концептуального положения оценим картину, которая складывается в области вскрытия новой поверхности, при совокупном действии механической и дополнительной тепловой энергий.

Физико-химические процессы и явления, которые возникают в зоне стружкообразования вследствие высвобождающейся тепловой энергии в момент осуществления контактных взаимодействий протонов условно можно разделить на две группы. К первой группе отнесём эффекты, наблюдаемые в микромасштабе, начиная от нанометрового диапазона до  $10^{-7}$  см (электронный и протонный газ), и проявляемые в макромасштабе — от 1 см до  $10^{-4}$  см.

Прежде всего, не вызывает сомнения отсутствие какой-либо жёсткой границы между двумя названными группами эффектов. Главное, что процессы и явления первой группы не являются изолированной системой и играют определяющую роль в инициировании второй группы эффектов.

К числу первой группы можно отнести следующие основные явления:

- увеличение частоты тепловых колебаний атомов металла, что приводит к активизации процесса пластической деформации и повышению вероятности разрыва сил межатомных связей;
- облегчение процессов скольжения кристаллов;
- снижение напряжения трения кристалла и напряжения, необходимого для начала движения дислокаций в связи с их осво-

бождением от примесных атмосфер;

— увеличение скорости перемещения дислокаций и облегчение преодоления препятствий;

— снижение уровня деформирующего напряжения, необходимого для движения дислокаций по пересекающим системам скольжения;

— увеличение вероятности «втягивания» протона в электронные оболочки ионов железа вплоть до самых глубоких уровней, что приводит к повышению окклюзии водорода;

— превращение объёмно-центрированной кубической структуры при нагреве ( $\alpha$ -железо) свыше  $900^{\circ}\text{C}$  в гранцентрированную кубическую структуру ( $\gamma$ -железо), а затем при охлаждении обратный переход  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо, что вызывает возникновение внутренних напряжений (возможны и другие структурные превращения, которые связаны с быстрым нагревом);

— тепловые «вспышки» способны вызвать мощную волну напряжений, достаточную для образования трещин.

Физические явления, возникающие вследствие контактных взаимодействий наноматериала, протонов и свободных атомов с реальной структурой металла, в результате действия положительной обратной связи между физико-химическим процессом и механическим разрушением, способствуют образованию различных структурных нарушений в деформируемом материале макрометрового диапазона. Комплекс таких нарушений и их ускоренное развитие под влиянием высокой температуры обуславливают эффективность действия различных углеводородсодержащих сред.

Рассмотрим некоторые примеры возникновения макродефектов.

1. В связи с наличием градиентов напряжения, вызванных дефектностью строения материала, протоны будут захватываться и распределяться в зоне стружкообразования очень неравномерно. Также неравномерно распределяются в объёме срезаемого слоя образующиеся в процессе деформирования новые дефекты (поры микроскопического размера, вакансии, дислокации, поверхности, границы, примесные атомы и др.), способные захватывать протоны. Поскольку импульсное высвобождение энергии в основном происходит в местах захвата протонов, то и «вспышки» химического превращения неравномерно распределяются в объёме срезаемого слоя металла, вызывая, в свою очередь, неравномерное распределение сильных внутренних полей напряжений, а затем и деформаций.

Существенное влияние на захват протонов оказывает также знак деформации. Так, например, при резании в объёмах локализованной области пластически деформируемого материала,

расположенной по линии среза, образуются зоны различной степени дефектности, где материал становится неоднородным, сначала вследствие границ зёрен, затем субзёрен, и, наконец, дислокаций и атомов. В связи с этим в материале, в зоне стружкообразования, в широком диапазоне будет возникать микронеоднородность температур — от нормальной перед границей срезаемого слоя до температуры плавления металла по линии среза.

2. С повышением температуры происходит значительный рост амплитуд колебаний атомов. Атомы начинают занимать места вакансий, переходить в междоузлия или, наоборот, вакансии из междоузлий будут занимать положения в узлах. Перемещение атомов под действием тепловых колебаний приостанавливается вследствие несовершенства строения решётки, что вызовет диффузионную пластическую деформацию. При этом согласованное совместное перемещение частиц данного ряда из одного положения в другое вызывает постепенный сдвиг данного атомного ряда по отношению к остальным. Следовательно, высвобождаемая тепловая энергия способствует облегчению процессов скольжения, которые будут происходить при значительно меньшем напряжении.

3. Специфика нагрева материала от импульсного высвобождения энергии влияет на характер разрушения. Она состоит в том, что тепловая энергия в зоне стружкообразования при импульсной вспышке создаётся непосредственно в реагирующем микрообъёме, тогда как в результате нагрева поверхностного слоя металла тепловая энергия распространяется за счёт теплопроводности. Как известно [32], при импульсном нагреве стали происходит образование структур, которые изменяют характер разрушения и не могут быть получены при термической обработке. Кроме этого, при таком нагреве процесс аустенизации происходит намного быстрее, чем при тех же температурах в печах или ваннах.

Одновременно с импульсными процессами высвобождения тепла, которые протекают, в основном, в структурных дефектах пластически деформируемой области металла и на поверхностях зоны стружкообразования, происходит также распространение тепла от поверхности, разогретой до температуры плавления металла, к поверхности заготовки, имеющей комнатную температуру. При этом железо, разогретое до 900°C, обладает гранцентрированной решёткой, а ниже этой температуры — объёмноцентрированной. Такой внезапный переход может сопровождаться возникновением и распространением волн напряжения, достаточного для образования сетки микротрещин.

4. Установлено [32], что быстрый нагрев и отвод тепла из высоконагретой области способствует протеканию структурных превращений типа закалки и отпуска, а тепловой удар по мартенси-

ту приводит к растрескиванию поверхности по границам бывшего аустенитного зерна.

Важно отметить, что некоторые отмеченные процессы и явления способны вызвать новые воздействия на деформируемый материал и вызвать новые изменения его свойств.

5. Увеличение концентрации водорода в ловушках, также как и возможное возникновение гидридов и гидридоподобных образований, может способствовать не только образованию кластеров, но и их переход в атомарно острую трещину.

6. Разнообразие процессов и явлений, вызванных дополнительным тепловыделением в зоне перестройки и разрыва связей, может привести также к изменению характера разрушения металла. Например, когда межкристаллитные связи в изменившихся условиях могут оказаться слабее самих зёрен, возрастёт вероятность разрушения материала по границам зёрен, а не внутри их [33].

7. Термическая активация сама по себе не может создавать дислокации и оказывать заметное влияние на начало пластической деформации. Вместе с тем, с повышением температуры в системе «металл–водород» существенно возрастает скорость деформации, и когда действующее напряжение станет равным критическому, уменьшится деформирующее напряжение и значительно раньше наступит отклонение от пропорциональности между напряжением и деформацией [34]. Если учесть, что термическая активация помогает дислокациям преодолевать препятствия, то комплекс процессов и явлений, обусловленных квантовыми эффектами, приведёт к снижению предела текучести, уменьшению площадки текучести и напряжения деформационного упрочнения [34], ускорению процесса зарождения трещин и их докритического и затем и закритического развития.

8. Из рассмотрения характера тепловых потоков, возникающих в процессе МПО, следует, что высвобождаемая тепловая энергия может оказывать как непосредственное влияние на процессы деформации и разрушения, так и косвенное: сначала вызывает различные структурные нарушения, а затем эти дефекты способны изменить ход механического процесса.

Таким образом, возникающее взрывное напряжение формирует состояние материала на выходе из зоны стружкообразования, при котором слой металла оказывается пронизанным многочисленными зародышами трещин, сетью микротрещин и другими дефектами, являющимися очагами повышенных напряжений. Это означает, что на следующем обороте заготовки деформированию и разрушению подвергается материал, обладающий повышенной дефектностью, что значительно снижает энергетические затраты на процесс резания.

В связи с изложенным, имеются все основания полагать, что основная роль в облегчении процессов деформации и разрушения металлов при МПО принадлежит дополнительной тепловой энергии, которая образуется в результате различных контактных взаимодействий водорода с деформируемым металлом. Дополнительное тепловыделение, сопутствующее различным взаимодействиям водорода с реальной структурой деформируемого металла, оказывая совокупное действие с внешним механическим усилием, облегчает и ускоряет процессы деформации и разрушения металла, значительно улучшает важнейшую технологическую характеристику — обрабатываемость материала резанием, которая определяется следующими критериями: интенсивностью износа инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, величинами возникающей силы резания и температуры, качеством обработанной поверхности при достижении оптимальных экономических показателей.

Таким образом, приведённые результаты исследований и их анализ показывают, что влияние поверхностно-активных сред на резание металла — сложный процесс, включающий различные реакции, происходящие в твёрдой, жидкой и газовых фазах, активирующий исходную среду до образования радикально активной водородной плазмы и её взаимодействия с электрически активной реальной структурой материала. Результаты промышленных испытаний показали необычайно высокую эффективность МПО, позволяющей существенно интенсифицировать процесс изготовления изделий при повышении качества обработанных поверхностей и достижении положительного экономического результата [6].

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер, *Физико-химическая механика металлов* (Москва: АН СССР: 1962).
2. В. И. Лихтман, П. А. Ребиндер, Г. В. Карпенко, *Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов* (Москва: АН СССР: 1954).
3. Ю. В. Горюнов, Н. В. Перцов, Б. Д. Сумм, *Эффект Ребиндера* (Москва: Наука: 1966).
4. Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер, *Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по коллоидной химии* (Москва: АН СССР: 1958).
5. А. И. Сошко, В. А. Сошко, *Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла* (Херсон: Олди-плюс: 2008), т. 1, 2.
6. В. А. Сошко, А. И. Сошко, *Механическая обработка металлов* (Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing: 2015).
7. А. И. Сошко, В. А. Сошко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 1: 117 (2017).

8. Р. Кристи, А. Питти, *Строение вещества: введение в современную физику* (Москва: Наука: 1969) (пер. с англ.).
9. В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнева, *Химия и физика механизмов* (Москва: Высшая школа: 1988).
10. А. М. Занин, Д. П. Кирихин, В. И. Гольданский, *ЖЭТФ*, **33**, № 6: 593 (1981).
11. П. Ю. Бутягин, А. М. Дубинская, *Успехи химии*, **38**, № 4: 593 (1968).
12. С. З. Рачинский, *Теоретические основы гетерогенного контактного катализа* (Москва: АН СССР: 1936), т. 1, 2.
13. В. Н. Подураев, *Резание труднообрабатываемых материалов* (Москва: Высшая школа: 1974).
14. Ф. Блатт, *Физика электронной проводимости в твердых телах* (Москва: Мир: 1971) (пер. с англ.).
15. В. Б. Фикс, *Ионная проводимость в металлах и полупроводниках* (Москва: АН СССР: 1958).
16. А. С. Ахметов, *Молекулярная физика граничного трения* (Москва: Физматгиз: 1962).
17. А. Адамсон, *Физическая химия поверхностей* (Москва: Мир: 1979) (пер. с англ.).
18. Т. И. Трофимова, *Курс физики* (Москва: Высшая школа: 2000).
19. Дж. Блейкмор, *Физика твердого тела* (Москва: Мир: 1985) (пер. с англ.).
20. Ю. А. Хрусталева, Б. В. Дерячак, *ДАН СССР*, **257**, № 2: 418 (1981).
21. *Металлы и сплавы: Справочник* (Ред. Ю. П. Солнцева) (Санкт-Петербург: НПО «Профессионал»: 2003).
22. *Водород в металлах* (Ред. Г. И. Альфельд, И. Фёлькль) (Москва: Мир: 1981), т. 1 (пер. с англ.).
23. Н. А. Галактионова, *Водород в металлах* (Москва: Металлургия: 1967).
24. Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, *Водородная хрупкость металлов* (Москва: Металлургия: 1967).
25. Т. А. Кокторова, *Некоторые проблемы прочности твердого тела* (Москва–Ленинград: АН СССР: 1959).
26. M. Born, *J. Chem. Phys.*, **7**: 591 (1939).
27. В. Д. Кузнецов, *Физика твердого тела* (Томск: Красное знамя: 1937), т. 1.
28. M. Born and R. Fürth, *Math. Proc. Cambridge Phil. Soc.*, **36**, Iss. 4: 454 (1940); <https://doi.org/10.1017/S0305004100017503>.
29. N. F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A*, **215**: 1 (1952).
30. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе, *Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах* (Москва: ИЛ: 1955) (пер. с англ.).
31. К. К. Андреев, *Термическое разложение и горение взрывчатых веществ* (Москва: Госэнергоиздат: 1957).
32. В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадёрров, В. И. Трефилов, *Физические основы электротермического упрочнения стали* (Киев: Наукова думка: 1973).
33. В. М. Финкель, *Физика разрушения* (Москва: Металлургия: 1970).
34. В. А. Тетерский, А. И. Сошко, *Влияние рабочих сред на свойства металлов: Сборник* (Киев: Наукова думка: 1964).

## REFERENCES

1. V. I. Likhtman, E. D. Shchukin, and P. A. Rebinder, *Fiziko-Khimicheskaya*

- Mekhanika Metallov* (Moscow: AN SSSR: 1962).
2. V. I. Likhtman, P. A. Rebinder, and G. V. Karpenko, *Vliyanie Poverkhnostno-Aktivnoy Sredy na Protsessy Deformatsii Metallov* (Moscow: AN SSSR: 1954).
  3. Yu. V. Goryunov, N. V. Pertsov, and B. D. Summ, *Effekt Rebindera* (Moscow: Nauka: 1966).
  4. E. D. Shchukin and P. A. Rebinder, *Tezisy Dokladov IV Vsesoyuznoy Konferentsii po Kolloidnoy Khimii* (Moscow: AN SSSR: 1958).
  5. A. I. Soshko and V. A. Soshko, *Smazochno-Okhlazhdayushchie Sredstva v Mekhanicheskoy Obrabotke Metalla* (Kherson: Oldi-Plyus: 2008), vol. 1, 2.
  6. V. A. Soshko and A. I. Soshko, *Mekhanicheskaya Obrabotka Metallov* (Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing: 2015).
  7. A. I. Soshko and V. A. Soshko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 1: 117 (2017).
  8. R. W. Christy and A. Pytte, *Stroenie Veshchestva: Vvedenie v Sovremennuyu Fiziku* [The Structure of Matter: an Introduction to Modern Physics] (Moscow: Nauka: 1969) (Russian translation).
  9. V. N. Kuleznev and V. A. Shershnev, *Khimiya i Fizika Mekhanizmov* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1988).
  10. A. M. Zanin, D. P. Kiryakhin, and V. I. Goldanskiy, *ZhETF*, **33**, No. 6: 593 (1981).
  11. P. Yu. Butyagin and A. M. Dubinskaya, *Uspekhi Khimii*, **38**, No. 4: 593 (1968).
  12. S. Z. Rachinskiy, *Teoreticheskie Osnovy Geterogenogo Kontaktnogo Kataliza* (Moscow: AN SSSR: 1936), vol. 1, 2.
  13. V. N. Poduraev, *Rezanie Trudnoobrabatyvaemykh Materialov* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1974).
  14. F. J. Blatt, *Fizika Elektronnoy Provodimosti v Tverdykh Telakh* [Physics of Electronic Conduction in Solids] (Moscow: Mir: 1971) (Russian translation).
  15. V. B. Fiks, *Ionnaya Provodimost' v Metallakh i Poluprovodnikakh* (Moscow: AN SSSR: 1958).
  16. A. S. Akhmetov, *Molekulyarnaya Fizika Granichnogo Treniya* (Moscow: Fizmatgiz: 1962).
  17. A. W. Adamson, *Fizicheskaya Khimiya Poverkhnostey* [Physical Chemistry of Surfaces] (Moscow: Mir: 1979) (Russian translation).
  18. T. I. Trofimova, *Kurs Fiziki* (Moscow: Vysshaya Shkola: 2000).
  19. J. S. Blakemore, *Fizika Tverdogo Tela* [Solid State Physics] (Moscow: Mir: 1985) (Russian translation).
  20. Yu. A. Khrustalev and B. V. Deryachak, *DAN SSSR*, **257**, No. 2: 418 (1981).
  21. *Metally i Splavy: Spravochnik* (Ed. Yu. P. Solntsev) (Saint-Petersburg: NPO 'Professional': 2003).
  22. *Vodorod v Metallakh* [Hydrogen in Metals] (Ed. G. I. Alefeld and I. Fölkl) (Moscow: Mir: 1981), vol. 1 (Russian translation).
  23. N. A. Galaktionova, *Vodorod v Metallakh* (Moscow: Metallurgiya: 1967).
  24. L. S. Moroz and B. B. Chechulin, *Vodorodnaya Khrupkost' Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1967).
  25. T. A. Koktorova, *Nekotoryye Problemy Prochnosti Tverdogo Tela* (Moscow–Leningrad: AN SSSR: 1959).
  26. M. Born, *J. Chem. Phys.*, **7**: 591 (1939).

27. V. D. Kuznetsov, *Fizika Tverdogo Tela* (Tomsk: Krasnoe Znamya: 1937), vol. 1.
28. M. Born and R. Fürth, *Math. Proc. Cambridge Phil. Soc.*, **36**, Iss. 4: 454 (1940); <https://doi.org/10.1017/S0305004100017503>.
29. N. F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A*, **215**: 1 (1952).
30. F. P. Bowden and A. D. Yoffe, *Vozbuzhdenie i Razvitie Vzryva v Tverdykh i Zhidkikh Veshchestvakh* [Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids] (Moscow: IL: 1955) (Russian translation).
31. K. K. Andreev, *Termicheskoye Razlozhenie i Gorenje Vzryvchatykh Veshchestv* (Moscow: Gosehnergoizdat: 1957).
32. V. N. Gridnev, Yu. Ya. Meshkov, and S. P. Oshkadyorov, V. I. Trefilov, *Fizicheskie Osnovy Ehlektrotermicheskogo Uprochneniya Stali* (Kiev: Naukova Dumka: 1973).
33. V. M. Finkel', *Fizika Razrusheniya* (Moscow: Metallurgiya: 1970).
34. V. A. Teterskiy and A. I. Soshko, *Vliyanie Rabochikh Sred na Svoistva Metallov: Sbornik* (Kiev: Naukova Dumka: 1964).

---

*Kherson National Technical University,  
24, Berislavs'ke Highway,  
UA-73008 Kherson, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. Scheme of the reaction zone.

<sup>2</sup> Fig. 2. Model of shock ionization of hydrogen.

<sup>3</sup> Fig. 3. Model of the distribution of cracks after the passage of a stretching wave in the zone of metal cracking. 1—cutting tools; 2—cracking zone; 3—radial cracks; 4—ring cracks; 5—area of elastic deformations; 6—area of plastic deformation; 7—processed material.