

PACS numbers: 34.35.+a, 06.60.Vz, 62.25.Mn, 81.20.Wk, 81.40.Np, 81.70.Bt, 83.50.Uv

## **Энергетические процессы в зоне преодоления сцепления между атомами, связанные с плазменным эффектом, образующимся в процессе резания**

А. И. Сошко, В. А. Сошко

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

Сформулирована проблема дальнейшего развития металлообработки. Показано, что интенсификация и совершенствование процесса резания во многом зависит от понимания физической сущности явлений, сопровождающих этот процесс. На основе обобщения исследований предложена гипотеза радикального улучшения обрабатываемости деталей с заданной точностью и качеством поверхности при одновременном достижении экономических результатов путём воздействия на зону стружкообразования объектов и материалов нанометрового диапазона. Полагалось, что синтез таких частиц, отличающихся высокой химической активностью, можно осуществить в зоне стружкообразования вследствие воздействия на полимерную основу смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) различных физико-химических процессов и явлений, имеющих квантовую природу и сопровождающих резание. Результаты проведённых исследований подтвердили предложенную гипотезу. Совокупность полученных экспериментальных данных показала, что различные контактные взаимодействия элементарных частиц с реальной структурой металла, возникающей вследствие механического воздействия, связаны, в первую очередь, с электрическими процессами между заряженными частицами и электрически активной структурой вещества. Такие кратковременные и достаточно долгие электрические процессы способствуют облегчению процессов деформации и разрушения. Установление связи микроконических процессов взаимодействия элементарных частиц с реальной структурой деформируемого тела позволило предложить механоплазменный способ обработки металла.

Поставлено проблему подальшого розвитку металлооброблення. Показано, що інтенсифікація та вдосконалення процесу різання значно залежить від розуміння фізичної сутності явищ, які супроводжують цей процес. На основі узагальнення досліджень запропоновано гіпотезу радикального поліпшення оброблюваності деталей із заданою точністю та

якістю поверхні при одночасному досягненні економічних результатів через вплив на зону стружкоутворення об'єктів і матеріалів нанометрового діапазону. Вважалося, що синтезу таких частинок, які вирізняються високою хемічною активністю, можна здійснити в зоні стружкоутворення через вплив на полімерну основу мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) різних фізико-хемічних процесів і явищ, що мають квантову природу та супроводжують різання. Результати проведених досліджень підтвердили запроповану гіпотезу. Сукупність одержаних експериментальних даних показала, що різні контактні взаємодії елементарних частинок з реальною структурою металу, яка виникає внаслідок механічного впливу, пов'язані, в першу чергу, з електричними процесами між зарядженими частинками й електрично активною структурою речовини. Такі короткочасні та достатньо тривалі електричні процеси сприяють полегшенню процесів деформації та руйнування. З'ясування зв'язку мікроконічних процесів взаємодії елементарних частинок з реальною структурою деформівного тіла уможливило запропонувати механоплазмовий спосіб оброблення металу.

The problem of further development of metalworking is formulated. As shown, the intensification and improvement of the cutting process depends largely on the understanding of the physical essence of the phenomena accompanying this process. Based on a review of research, a hypothesis is proposed for a radical improvement in the machinability of parts with a given accuracy and a surface quality, while simultaneously achieving economic results by influencing the chip-formation area of objects and materials of the nanometre range. As suggested, it is possible to carry out the synthesis of such particles characterized by high chemical activity in the zone of chip formation due to the impact on the polymer base of the coolant by means of various physicochemical processes and phenomena of quantum nature accompanying the cutting. The results of the studies confirmed the proposed hypothesis. The totality of the experimental data show that various contact interactions of elementary particles with the actual metal structure, arising because of mechanical action, is associated primarily with electrical processes between charged particles and the electrically active structure of the substance. Such short-term and sufficiently long-term electrical processes facilitate the processes of deformation and fracture. Revealed connection of microconic processes of interaction of elementary particles with a real structure of a deformable body allows us to propose a mechanoplasmic method of metal processing.

**Ключевые слова:** плазма, синтез, элементарные частицы, взаимодействие, разрушение, полимерсодержащая СОЖ, эффективность.

**Ключові слова:** плазма, синтез, елементарні частинки, взаємодія, руйнування, полімервмісна МОЖ, ефективність.

**Key words:** plasma, synthesis, elementary particles, interaction, destruction, polymer-containing coolant, efficiency.

*(Получено 29 марта 2019 г.; после доработки — 16 апреля 2019 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развиваемые представления о механизме явлений, возникающие в процессах механической обработки твёрдых тел в поверхностно-активных средах, относятся к самым разнообразным случаям преодоления сцепления между атомами в различных технологических процессах. Среди них особое место занимает исключительно сложная по своей многоплановости и экстремальности условий протекания процесса механическая обработка металла резанием, включающая трение, пластическое деформирование и разрушение материала при непрерывном поливе зоны разрушения технологической жидкостью с несколькими десятками растворенных и эмульгированных в ней компонентов — смазочно-охлаждающим технологическим средством (СОТС). Процессы и явления, возникающие при разрушении твёрдого тела в таких предельных условиях, обычно не встречаются ни при стандартных испытаниях, ни в других технологических процессах.

Даже беглый и, естественно, неполный перечень исследуемых в этой области науки проблем, свидетельствуют о значительном интересе к ней интенсивно развиваемых молекулярной физики твёрдого тела, физической химии поверхностных явлений и ряда отраслей технологий.

В данной работе обобщаются исследования авторов в области физико-химического взаимодействия среды с твёрдым телом в момент его разрушения.

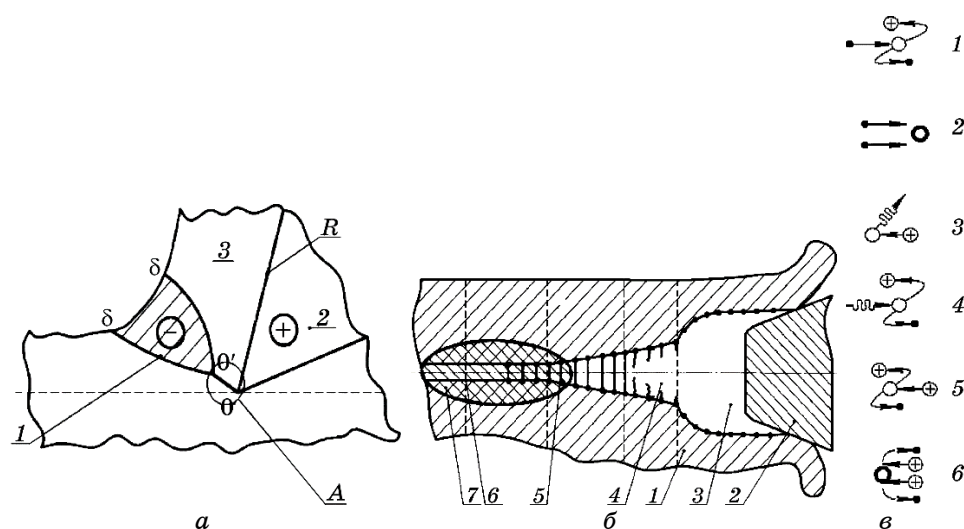
## 2. ТЕОРИЯ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ СОТС

Общепринятые представления о механизме влияния поверхностно-активной жидкости на прочность твёрдого тела начали формироваться с ведущей идеи высказанной П. А. Ребиндером ещё в начале прошлого века [1]. В дальнейшем она была всесторонне исследована его сотрудниками и последователями и в принципиальном отношении эти представления не претерпели изменений до настоящего времени [2–10]. Физический смысл данной группы явлений заключается в том, что облегчение процессов деформации и разрушения тела в окружающей среде является результатом снижения его свободной поверхностной энергии вследствие обратимого (адсорбционного) взаимодействия деформируемого твёрдого тела со средой. Во всех этих исследованиях полагалось, что в процессе разрушения тела исходные свойства окружающей среды остаются неизменными.

Исключительное значение представлений о физической природе влияния различных сред на процессы деформации и разруше-

ния отражается в непрерывном росте исследований, результаты которых систематически обсуждаются и обобщены во многих обзорах и монографиях [3, 11–14]. И, тем не менее, несмотря на достигнутые успехи, в трактовке механизма понижения прочности твёрдого тела при его контакте с поверхностно-активной средой допускается ряд неточностей и даже противоречий и он, безусловно, нуждается в дальнейших исследованиях, проработке и апробации.

В этой связи необходимо выделить экспериментальные результаты, которые демонстрируют наличие водорода в стружке и в обработанных поверхностях армко железа и стали после резания в любой углеводородной среде и в воде [11]. Поскольку водород может диффундировать в очаг разрушения металла только в протонном состоянии [12–15], то это означает, что исходная водорододержащая поверхностно-активная среда превращается в зоне



**Рис. 1.** Схематическое изображение процесса образования водородной плазмы в щелевом пространстве: (а) зона стружкообразования: 1 — заготовка, 2 — зона пластической деформации; (б) схема плазменного потока в щелевом пространстве: 1 — заготовка, 2 — инструмент, 3 — щелевое пространство, 4 — вершина трещины, 5 — область неоднородного материала, 6 — зона опережающей пластической деформации; (в) схема ударной ионизации в результате столкновений и взаимодействий: 1 — электронов с нейтральными молекулами и нейтральными атомами с образованием вторичных электронов и положительных ионов, 2 — вторичных электронов с атомами, 3 — положительных ионов с атомами с образованием фотона, 4 — фотона с нейтральным атомом и его ионизация, 5 — положительных ионов с атомами и их ионизация, 6 — потока ионов с атомами.<sup>1</sup>

разрушения в радикально-активную газовую смесь, содержащую диссоциированный водород, который, диффундируя в материал, становится активным участником процесса деформации и разрушения. Отсюда следовал вывод: изменение физических и механических свойств металла при его деформировании в поверхностно-активной среде происходит не вследствие снижения его свободной поверхностной энергии в результате адсорбции исходной среды, а благодаря уникальным свойствам протона водорода. Дальнейшие исследования подтвердили первые экспериментальные данные [11, 13].

Было установлено, что в зоне резания металла в углеводородных средах (СОТС) химический состав атмосферы представляет собой газовую смесь, состоящую из водорода, предельных алифатических углеводородов от  $C_2$  до  $C_7$ , а также адсорбированного на лезвии инструмента пирополимерного остатка — аллотропической модификации углерода в виде графита. Дальнейшие радикальные изменения свойств образовавшейся углеводородной газовой смеси продолжают непосредственно в области разрушения металла с образованием на последнем этапе превращений водородной плазмы [11, 15]. Установлено, что химическая активация среды происходит в начале на горячих поверхностях стружки и инструмента, а затем на каталитически активных вновь образующихся поверхностях трещины и в пространстве, ограниченном поверхностью вершины резца и полостями трещины разрушения (рис. 1). Именно здесь, в реакционной щели, создаются необходимые условия для иницирования и самоускорения химических превращений образовавшихся ранее газовых углеводородов вплоть до водородной плазмы [12].

Были также визуализированы ионизаторы среды, каковыми являются постоянные спутники разрушения металла: термоэлектрические, электрохимические и механохимические процессы и явления, а также образующаяся в момент разрыва сил связей новая каталитически активная поверхность [12]. Как известно такая свежееобразованная электрически активная структура характеризуется периодическим распределением точечных дефектов, ступеньками скола, а также выходящими на её поверхность линейными дефектами кристаллической решётки, границами зёрен, фаз и двойников. Показано, что такие электрически активные элементы поверхности, представляя собой микроэлектроды, являются, с одной стороны, источниками электронов и ионов, принимающих участие в поверхностных реакциях, а с другой, — могут быть действующими как тормозящими, так и ускоряющими потенциалами при различных физических процессах при миграции электронов и ионов на таких поверхностях. На активных центрах неоднородной вновь образующейся поверхности может

происходить электрический контакт с частицами среды, что вызывает их химические превращения с образованием ионизированного водорода [13].

Изучение хемосорбции и простых химических реакций на поверхности, образованной в результате разрушения металла, показало [11], что при этом достигается весьма значительное повышение химической активности адсорбированных молекул. Так, например, хемосорбция молекул водорода, азота и кислорода на чистой поверхности железа приводит к их диссоциации с образованием атомов и ионов. Причём, диссоциация протекает очень быстро ( $10^{-5}$  с), практически без энергии активации. Другим источником ионизации водорода может быть его тепловая и ударная ионизация потоком электронов, вылетающих из вершины растущей трещины, а также самоускоряющиеся в щелевом пространстве процессы взаимодействия положительных ионов с электронами, атомами и нейтральными молекулами водорода [8, 11, 12]. Образующейся слабо ионизированный газ представляет собой, по крайней мере, смесь электронов, однократно заряженных ионов, атомные и молекулярные ионы водорода [16].

Одновременно с процессом ионизации газа в реакторной зоне идёт обратный процесс — процесс рекомбинации: положительные и отрицательные ионы, встречаясь с электронами, соединяются с ними с образованием атомов и молекул водорода, что сопровождается выделением большой тепловой энергии [9, 12, 16]. Если реакция экзотермична, т.е. идёт с выделением тепла, как в рассматриваемом случае, то она может самоускоряться, поскольку обычно скорость реакции растёт с повышением температуры. В связи с тем, что в реакционной щели имеет место теплоотвод из щели, возникает конкуренция тепловыделения и теплоотвода. Однако можно полагать, что в щелевом пространстве тепловыделения превышают теплоотвод, реакция самоускоряется и приобретает взрывной характер, что приводит к лавинообразному нарастанию числа активных частиц. Образовавшаяся газовая смесь, состоящая из положительно и отрицательных частиц, «фильтруется» вершиной трещины, обладающей отрицательным зарядом, и клином инструмента, имеющим положительный заряд: вдоль узкого пространства к вершине трещины перемещаются положительно заряженные частицы, а к инструменту — отрицательные. Своевременное поступление протонов в зону разрушения тела перед вершиной трещины достигается за счёт известного эффекта электронного «ветра».

Таким образом, контактные взаимодействия протонов происходят с локальными электрически активными дефектными поверхностями и с новой электрически активной структурой, возникающей в ультрамикроскопических областях непосредственно в

зоне преодоления сцепления между атомами. Это означает, что в процессе резания на процесс деформации и разрушения металла оказывает совместное действие механическая и тепловая энергия. В результате параллельного хода механического и термического процесса происходит, снижение устойчивости кристаллической решётки [17], а такая обработка фактически является механо-плазменной обработкой (МПО).

Из модели активации исходной среды вытекает важный практический вывод: для повышения эффективности СОТС необходимо искать к ним присадки не среди поверхностно-активных веществ, как это происходит сегодня, а среди соединений, способных в условиях зоны резания дать максимальный выход водорода. Такими свойствами обладают высокомолекулярные соединения, например, алифатические гетероцепные предельные полимеры. Эти полимеры, главные цепи которых построены из атомов углерода, а в боковые группы входит водород (полиэтилен) или водород и хлор (поливинилхлорид), обладают энергией активации распада молекул на несколько порядков меньше своих низкомолекулярных аналогов [12].

Этот вывод многократно подтверждён результатами промышленного применения СОТС с добавками полиэтилена (ПЭ) и поливинилхлорида (ПВХ), которые показали чрезвычайно высокую эффективность в процессах резания и обработке металлов давлением [11].

Таким образом, выводы, которые следуют из экспериментально подтверждённой модели активации среды, свидетельствуют о решающей роли водорода в облегчении процессов разрушения и деформации. Они же согласуются с результатами промышленных испытаний СОТС на полимерной основе, что открывает новые возможности для применения водорода в различных обрабатывающих технологиях [12, 18].

Из широкого круга проведённых исследований далее рассматриваются наиболее важные вопросы, решение которых позволит увязать регистрируемые макроэффекты, отражающие влияние среды на процессы деформации и разрушения при резании, с эффектами, проявляемыми в микромасштабе, возникающими в связи с выделением тепловой энергии вследствие контактных взаимодействий протона с реальной структурой материала.

Следует отметить, что изучение взаимодействия электрически активного водорода с реальной электрически активной структурой твёрдого тела, а также движение водорода в узкой щели при ярко выраженном полярном эффекте (деформация решётки) в электромагнитном поле представляет одно из интереснейших направлений в области физической химии. Такие исследования представляют ещё и методическую привлекательность, поскольку

здесь, практически в «чистом» виде, можно отдельно изучать множество физико-химических и механических процессов и явлений, сопутствующих разрушению, но составляющих общую физическую картину механической обработки твёрдых тел.

### **3. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ЭФФЕКТА**

Как уже отмечалось, химическая активация исходной поверхностно-активной среды протекает в несколько этапов, которые характеризуются изменениями её химического состава. На первом этапе превращений на горячих поверхностях происходит пиролиз входящих в состав СОТС углеводородных соединений, с образованием газовой смеси углеводородов и твёрдого остатка — углерода. В дальнейшем, под действием различных ионизаторов, образовавшаяся смесь превращается сначала в слабо ионизированный водородный газ, а затем в водородную плазму. Все эти превращения протекают по ходу механического процесса: начинаются на горячих поверхностях заготовки и стружки, а заканчиваются у вершины трещины. В дальнейшем образовавшиеся электрически активные частицы водорода вступают в контактные взаимодействия с непрерывно обновляющейся электрически активной структурой материала, сформированной на поверхности, в приповерхностном слое и в объёме материала, т.е. в области перед острием трещины, где материал становится, неоднородным. В результате таких взаимодействий выделяется большая тепловая энергия и образуется атомарный, а затем и молекулярный водород. В связи с этим изменение (облегчение) процессов деформации и разрушения деформируемого металла следует связывать именно с этими процессами и явлениями.

Здесь следует отметить два важных факта, наличие которых доказано экспериментально. Во-первых, установлено, что действительно поверхностно-активные среды (в том числе и СОТС) в условиях зоны резания претерпевают химические превращения с образованием активных форм водорода. И, во-вторых, образующийся водород содержится в стружке и в поверхностных слоях обработанной заготовки [11]. Таким образом, полученные результаты исследований подтверждают ранее высказанные предположения о химических превращениях исходной среды.

Дальнейшие исследования были сконцентрированы на решении основного вопроса — о механизме химических реакций поверхностно-активной среды в радикально-активную. При решении этой задачи необходимо было учитывать, что такие превращения, связанные с изменением химического состава среды, протекают в узкой зоне, где огромное значение имеют физические



факторы, комплекс которых и создаёт необходимые условия для получения ионизированного водорода. Решающую роль в этом случае играет кинетика химических реакций, так как эффективность среды зависит от скорости образования оптимальной концентрации элементарных частиц и своевременного их поступления в очаг разрушения.

Экспериментальный материал, полученный на начальном этапе исследований, позволяет заключить, что эффективность МПО, даже более того, сама возможность протекания химических реакций, зависит от исключительной роли трещины в этих процессах и явлениях. Важно отметить, что распространение трещины связано не только с самими основами теории прочности и разрушения. В данном случае трещину можно представить как пусковое устройство, включающее процесс инициирования химических реакций, а также обуславливает их скорость и своевременное поступление активного материала непосредственно в область перестройки и разрыва межатомных связей [12]. Таким образом, кинетика разрушения, т.е. основные параметры роста трещины, дают заключение о возможности и скорости протекания химического превращения, которые при прочих равных условиях, связаны с параметрами механической обработки. Это означает, что существует взаимосвязь кинетики роста трещины с физико-химическими процессами и явлениями, которые создают необходимые условия для ионизации среды. Поэтому физико-химический комплекс процессов и явлений, который является постоянным спутником растущей трещины, позволяет реализовать МПО. Для этого необходимо, чтобы:

— пространство реакционной зоны пронизывалось потоком электронов высокой энергии и большой интенсивности, испускаемого из вершины трещины в процессе перестройки и разрыва сил межатомных связей деформируемого тела, а также электромагнитным полем, образующимся в связи с наличием термоэлектродвижущей силы в системе «станок–инструмент–заготовка»; можно полагать, что такие условия соблюдаются в процессе резания, поскольку известно, что в момент роста трещины излучаются электроны с энергией примерно  $10^2$  эВ с интенсивностью  $6 \cdot 10^3$  импульсов в минуту [19];

— в результате использования энергии, запасённой на свежесформированных поверхностях, на них инициировались и самоускорялись химические реакции;

— наличие электрически активных дефектных участков свежесформированных поверхностей представляли бы собой микроэлектроды, являющиеся, с одной стороны, источниками электронов и ионов, принимающих участие в поверхностных реакциях, а с другой, — действующие как тормозящие или ускоряющие по-

тенциалы при миграции электронов и ионов на поверхности кристаллов при различных физико-химических процессах;

— область материала у вершины трещины приобретала предельно сконцентрированный отрицательный электрический заряд (эффект Холла) в связи с затруднением движения электронов вследствие концентрации большого количества различных дефектов и неупорядоченным состоянием материала, а также вследствие деформации решётки вокруг атома водорода [20, 21];

— было наличие отрицательного электрического заряда в вершине трещины и положительного заряда, которым бы обладал клин инструмента, которые определяют вектор перемещения в щелевом пространстве заряженных частиц водорода:  $H^+$  — в сторону вершины трещины, а  $H^-$  — в направлении инструмента [12];

— наличие электрического поля в системе металл–водород инициировало бы эффект электронного «ветра», что должно обеспечить амбиполярную диффузию  $H^+$  вглубь металла со скоростью, превышающей скорость деформирования тела [12].

Согласно предлагаемой модели в процессе резания в локализованном микрообъёме пластически деформируемого металла, доведённого до разрушения, создаются также условия, которые достаточны для инициирования и завершения активации среды, а также для переноса электрически заряженных частиц водорода из газовой фазы к поверхностям у вершины трещины, а затем и в объём материала.

Упрощённо идеализированная физическая модель реакционной зоны представлена на рис. 1. Эта зона состоит из микрощели, образующейся между лезвием инструмента и местом отделения частиц металла от поверхности заготовки (рис. 1, б). Полагается, что микрощель сопрягается с микротрещиной, переходящей в область материала, где осуществляются акты перестройки и разрыва сил связей. Важно отметить, что при построении модели использован ряд допущений и неопределённых параметров процесса разрушения. В частности, с учётом наномасштаба построения модели, полагалось, что:

— резание металла основано на процессе пластического течения, а трещина образуется в результате скольжения слоёв металла друг относительно друга в связи с достижением локализованной в малом объёме исключительно высокой деформации;

— частицы металла, находящиеся на поверхности границы зоны стружкообразования и остальной массой металла обрабатываемой заготовки не контактируют с лезвием инструмента, образуя микрощель;

— конфигурация трещины подобна клину с устьем, сходящим до атомного масштаба;

— трещина предшествует как вязкому, так и хрупкому разрушению металла;

— зона опережающей пластической деформации перед вершиной трещины достигает примерно перед резцом 5–6 мкм, а под резцом — 3 мкм [22]; в этой зоне формируется ложе будущей трещины в виде тонкой канавки.

Возникающие в реакционной зоне контактные взаимодействия водородной газовой смеси с электрически активной новой структурой в момент её образования, комплекс разнообразных физико-химических явлений, имеющих квантовую природу (рис. 1, в) и вызывающих ускорение процессов химической активации среды, а также возможная самоактивация реакции в результате действия положительной обратной связи между физико-химическими и механическими процессами играют главную роль в облегчении деформации и разрушения при механоплазменной обработке.

Как известно, водород в протонном состоянии свободно диффундирует через кристаллическую решётку, но захватывается ловушками — различными дефектами. Поэтому при резании одна часть потока протонов будет захватываться поверхностными дефектами, а оставшиеся протоны — объёмными.

Изучение механизма реакций на чистых поверхностях позволяет выделить в рассматриваемом процессе две стадии: электрохимические, связанные с переносом электрона и стадия химических превращений в целевом пространстве высоко реакционно-способных частиц углеводородной газовой смеси. При этом образующиеся в пространстве продукты могут вступать в электрохимическую реакцию на поверхности щели. К этому следует добавить, что в электрохимическую реакцию вступают не только частицы, имеющие заряд противоположный заряду электрически активных элементов поверхности являющиеся источниками электронов и ионов, но и нейтральные молекулы водорода и даже протоны, имеющие тот же самый заряд, что и микроэлектроды на поверхности щели. Однако в этих случаях адсорбция на каталитически активной поверхности будет осуществляться не за счёт действия электрических зарядов, а путём диффузии и конвекции [19, 20].

Пластически деформированная область материала перед острием трещины содержит большое количество различных дефектов — точечных, линейных, поверхностных и объёмных. Эти дефекты захватывают протоны, с образованием атомов и молекул водорода, что сопровождается выделением тепла. В свою очередь образовавшиеся атомы и молекулы, в результате взаимодействия между собой, могут образовывать кластеры [23].

Таким образом, в целом, водород может захватываться в сильно деформированных областях вокруг устьев трещин, дислока-

ций, в целом ряде мест, где его влияние снижает механическую прочность металла. Вне области пластически деформированного материала за начальной границей зоны стружкообразования концентрация дефектов значительно снижается и уменьшается в ней содержание водорода. При выходе точек деформируемого тела из зоны контакта с поверхностями инструмента материал сохраняет структуру, образовавшуюся под влиянием водорода в подрезцово-вой части пластически деформированного тела. Следовательно, в зоне стружкообразования впереди режущей кромки инструмента находится уже пластически деформированный слой материала, структура которого сформирована действием внешнего механического усилия и водорода. Эта область охватывает как срезаемый слой, так и часть заготовки, находящей за линией среза, которая будет деформирована и разрушена при новой встрече с клином инструмента. Это означает, что фактически в зону стружкообразования поступает материал, свойства которого отличаются от свойств заготовки.

В реакционной зоне осуществляется также направленное перемещение заряженных частиц к вершине трещины и в сторону инструмента. Этот процесс становится возможным в связи с тем, что перед вершиной микрощели в области пластически деформируемого металла концентрируется большое количество различных дефектов. Такие дефекты затрудняют движение электронов в кристаллической решётке и являются их ловушками. Вследствие этого в пластически деформируемой области перед устьем трещины наблюдается повышенная концентрация электронов. Полярный эффект наблюдается также в связи с деформацией решётки вокруг атома водорода. Следовательно, область материала, где происходит перестройка и разрыв сил связей между атомами, приобретает предельно сконцентрированный отрицательный электрический заряд. Вследствие этого из образовавшейся плазмы частицы водорода, обладающие положительным электрическим зарядом, перемещаются в сторону отрицательного, т.е. в очаг разрушения, а частицы  $H^-$  двигаются в сторону положительного заряда к инструменту. Положительный заряд инструмент приобретает в связи с тем, что электроны с клина инструмента стекают в стружку, как более нагретую область материала.

Таким образом, реакционную зону 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. Кроме этого, в результате действия положительной обратной связи между химическим процессом и механическим разрушением, происходит ещё и самоускорение химических реакций.

#### 4. ВОЗМОЖНЫЕ ФОРМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ ВОДОРОДА С МЕТАЛЛОМ

Тот факт, что простейший из всех химических элементов водород играет решающую роль в изменении механических свойств металла при его разрушении в любой технологической углеводородной поверхностно-активной жидкости, ставит задачу дальнейшего изучения закономерностей его влияния на процессы деформации и разрушения. Такие исследования представляют исключительное значение как при разработке разнообразных способов, в которых по технологическому процессу необходимо преодолевать межатомное сцепление твёрдых тел, так и в создании методов защиты металлических конструкций от негативного влияния водорода.

Взаимодействие протонов  $H^+$  с металлом в области его разрушения — сложный процесс, включающий различные химические реакции, происходящие на внешних и внутренних поверхностях, на границах зёрен и субзёрен, взаимодействие водорода с дислокациями, атомами твёрдого тела, неметаллическими включениями и др. Например, при взаимодействии протонов с ионами металла могут протекать реакции, которые вызывают или не вызывают структурные изменения, не приводящие к образованию химических соединений на внутренних поверхностях и реакции с образованием этих соединений, а также реакции, при которых на внутренних поверхностях образуются молекулы химического соединения, тут же переходящие в газовую фазу [15].

При механической обработке резанием различные контактные взаимодействия электрически активных частиц водорода с электрически активной реальной структурой металла, образующейся в процессе деформации и разрушения, происходят по всему объёму упруго-пластически деформируемого слоя металла перед вершиной трещины. Характер проявления таких процессов имеет свои особенности, и он связан с различиями во взаимодействии водорода с реальной структурой материала, изменяющейся на всех стадиях его деформирования и разрушения. Вместе с тем, разнообразие этих взаимодействий и форма их проявления приводят, в конечном счёте, к одинаковому результату — облегчению процессов деформирования и разрушения. Например, выделяющаяся тепловая энергия при взаимодействии водорода с металлом оказывает влияние на процессы деформации и разрушения аналогично механическим нагрузкам, т.е. способствуют облегчению их протекания [24]. Вследствие взаимодействия водорода с предварительно введёнными в металл атомами растворённых в нём элементов, частиц выделений, твёрдых фаз и сидячих дислокационных петель устраняются препятствия движению

дислокаций, снижая тем самым уровень структурного упрочнения [24, 25]. Такие процессы способствуют увеличению скорости перемещения дислокаций и облегчают, либо вообще устраняют энергетические затраты на их выход на внутренние поверхности, т.е. увеличивают скорость пластической деформации [23].

Следует различать контактные взаимодействия протона с поверхностью металла, с прилежащим к ней слоем, т.е. в переходной области, а также в ультрамикроскопических областях тела непосредственно в зоне преодоления сцепления между атомами. В общем виде такие взаимодействия уже были рассмотрены. Здесь мы остановимся на переходной области от поверхности в объём и пластически деформируемым материалом перед острием трещины, где происходят перестройка и разрыв сил сцепления.

При «входе» протонов в твёрдое тело они диффундируют через переходную область, между поверхностью и объёмом металла. Вследствие этого в 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 такого образования будет превышать электронный заряд и поэтому электрон, вместе с окружающим его «облаком» положительного заряда, будет притягиваться к другому свободному электрону [20]. Электроны проводимости и протоны фактически становятся «привязанными» друг к другу и под действием внешнего электрического поля продолжают совместное перемещение вдоль срезаемого слоя. Таким образом, в переходной области создаются условия для проявления известного эффекта электронного «ветра» [20], благодаря чему скорость перемещения водорода будет значительно превышать скорость процесса разрушения. Такое предположение подтверждено следующими экспериментальными данными.

Проводилось сверление стали в воде и в воде с добавкой (1,5%) латекса поливинилхлорида [11]. Полученные отверстия рассверливали на воздухе сверлом, диаметр которого на 1 мм превышал диаметр начального отверстия и их поверхности анализировались. Для обнаружения водорода в материале применялся метод температурно-программируемого нагрева образцов, помещённых в вакуумируемый объём с одновременной масс-спектроскопической регистрацией выделяющегося водорода [11]. Было установлено, что масс-спектрометрический сигнал, характерный водороду, 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 свидетельствовало о химических преобразованиях поли-

мера, содержащегося в воде, с образованием большой концентрации водорода. В спектре образца после рассверливания на воздухе также обнаруживался пик водорода, хотя и с меньшей интенсивностью равной 10% от исходного значения. Полученные результаты доказывают высокую скорость диффузии водорода в пластически деформируемой области металла.

Следует отметить, что увлечение протонов электронами проводимости настолько велико, что положительно заряженные ионы водорода двигаются в сторону анода, против поля, подобно частицам с отрицательным зарядом [13]. Такая диффузия протекает со скоростью коллективного перемещения, которая уменьшается по сравнению со скоростью перемещения одних электронов в  $(m_{H^+}/m_{e^-})/2$  раз. Даже при том, что масса протона в 1836 раз больше массы электрона, и при одинаковом ускоряющем напряжении линейная скорость протона, хотя в 43 раза и меньше скорости электрона, однако она всё же значительно превышает скорость роста трещины. Следовательно, при резании в полимерсодержащей СОЖ водород своевременно поступает к вершине трещины и в объём материала перед её острием, взаимодействуя с вновь образующийся реальной структурой металла.

Параллельно этому процессу протоны, под влиянием электрического поля, проходят свободно сквозь идеально правильную кристаллическую решётку, без рассеяния на узлах [15]. Такая решётка не оказывает сопротивление току ионизации. Однако рассеяние протонных волн и связанное с ним сопротивление материала их перемещению всё же возникает, если в кристаллической решётке существуют центры рассеяния — искажения правильности кристаллической решётки, а также поры, границы, примесные атомы и другие дефекты. Поскольку все реальные твёрдые тела содержат точечные, линейные или поверхностные дефекты, которые представляют собой объёмные ловушки для водорода [23], то в процессе амбиполярной диффузии, из потока совместно перемещающихся электронов и водорода, последний будет захватываться дефектами, т.е. объёмными ловушками [23]. Процесс захвата становится возможным, когда состояние атомов металла позволяет удерживать протоны своим электрическим полем, которое превышает силу внешнего электрического поля. Большинство исследователей считает, что энергия захвата достаточно большая и составляет несколько десятых электрон-вольта, что значительно превышает силу электронного «ветра» [23].

Известно, что из всего многообразия ловушек водорода наиболее эффективными являются поры, которые образуются в результате взаимодействия протонов между собой, либо в связи с кластеризацией вакансий, либо как результат механической, термической, радиационной и других видов обработки металла [20].

Конструкционные материалы даже в исходном состоянии содержат поры, которые имеют технологическое происхождение. Общий объём пор может достигать десятков процентов объёма материала [24]. Резонно предположить, что наличие пор может существенно влиять не только на способность материала накапливать, но и пропускать водород. Такое предположение обосновывается тем, что достигая поверхности поры, протоны водорода рекомбинируют с другими протонами или с электронами проводимости и могут проникать внутрь полости, накапливаться в виде молекулярного газа, а затем диссоциировать на её поверхности и обратно растворятся в материале. Поэтому количество водорода в полости будет определяться двумя потоками через её поверхность — потоком десорбции из материала в полость и потоком адсорбции из полости на поверхности материала [23, 26]. В процессе резания благодаря непрерывности амбиполярной диффузии водорода, в порах может происходить накопление водорода.

Следовательно, имеются все основания полагать, что в процессе резания в системе металл–водород имеются два вида объёмных ловушек: ловушки в которых возможно накопление водорода (кластеры, поры, т.е. объёмные дефекты) и ловушки, которыми водород захватывается, но не накапливается (границы зёрен и субзёрен, вакансии, примесные атомы, дислокации, т.е. точечные и линейные дефекты).

Таким образом, на первой стадии взаимодействия протона с дефектом происходит быстрый перенос одного электрона с электронной оболочки атома железа и образование атома водорода, т.е. реализуется известная уникальная способность протона поляризовать электронные оболочки взаимодействующих с ним атомов железа. В результате деформации электронного облака атома железа уменьшаются силы связи между его атомами, а такие групповые взаимодействия отразятся на энергозатратах на разрушение металла.

Образовавшийся в результате рекомбинации протона атом H, являясь электрически нейтральным, скорее всего, будет, внедряться в межатомные пространства решётки, а также замещать в ней вакантные места. В связи с этим, каждый внедрённый атом водорода может вызывать смещение атомов металла из их равновесных положений, и возникающие искажения кристаллической решётки будут приводить к целому ряду изменений физических свойств и снижению прочности металла [23, 27]. Например, комплексное влияние водорода, в результате его взаимодействия с атомом железа вызывает увеличение напряжений, составляющих 8–10 кг/мм<sup>2</sup>, и по порядку величин приближается к прочностным характеристикам железоуглеродистых сплавов [15].

В этой связи следует также отметить, что даже один атом  $\gamma$ -



железа связывает до 5 протонов водорода [23]. Благодаря значительным электростатическим силам взаимного притяжения происходит «захват» водорода, то есть в этом случае способность атома железа удерживать валентный электрон слабее способности протона водорода присоединить электрон. В результате протон водорода присоединяет электрон и образует атом ( $H^+ + e^- \rightarrow H$ ), а реакция проходит с выделением тепловой энергии, составляющей примерно 100 ккал/моль. В дальнейшем реакция проходит по следующей схеме:  $H + H_2 \rightarrow hv$ ;  $2H + Fe \rightarrow H_2 + Fe^* + hv$ ,  $Fe + H_2 \rightarrow Fe + H + H + hv$  и т.д. Причём, процессы, протекающие от возникновения первичных ионов до образования новых, а также молекулярных продуктов и свободных радикалов, протекают с выделением тепла и завершаются всего за  $10^{-5}$  сек [12].

Общепризнанной является точка зрения, что пластическая деформация и фазовые превращения становятся возможными и ускоряются за счёт движения дислокаций [10]. Следовательно, от того в какой степени и как водород будет влиять на перемещения дислокации в том или ином кристалле, в значительной мере зависит предел его упругой и пластической деформации, а также напряжение, приводящее к разрушению кристалла.

По вопросу механизма влияния водорода на движение дислокаций проводился и проводится целый ряд специальных исследований и в большинстве предложенных гипотез и теорий роль водорода в одних и тех же процессах и явлениях трактуется по-разному в зависимости от развиваемых авторами концепций [3, 8, 11–14, 28].

Так, например, сторонники механизма взаимодействия водорода с дислокациями, построенного на теории хрупкого разрушения [3, 28], утверждают, что присутствие водорода приводит к увеличению хрупкости всех без исключения металлов [3, 14, 15]. В тоже время в работах [9, 10, 11] показано, что водород может разблокировать дислокации и облегчать пластическое течение металла. Можно провести и другие примеры, когда неоднозначно трактуются механизмы протекания процессов, приводящих на конечной стадии разрушения к одинаковым результатам.

Как уже отмечалось, химические реакции исходной поверхностно-активной среды в зоне резания протекают с выделением большого количества тепловой энергии. С увеличением числа участвующих в реакциях веществ интенсивность диссоциируемого тепла возрастает, в результате чего повышается локальная температура в микрообъёме обрабатываемого материала. Следовательно, в процессе резания различные взаимодействия водорода, как между его активными частицами, так и с деформируемым металлом, сопровождаются своеобразными тепловыми микровзрывами, приводящие к «групповому» тепловыделению. Та-

кие микровзрывы, сопровождаемые выделением тепла, приводят к увеличению внутренней энергии системы, что будет способствовать снижению суммарной энергии, затрачиваемой на разрушение твёрдого тела. Подобные тепловые явления способствуют также образованию зародышевых разрывов сплошностей — субмикротрещин и ускоренному росту трещин уже имевшихся в материале, что согласуется с известной теорией Борна, в которой механическое разрушение рассматривает как плавление, вызванное действием внешних сил [17].

Водород взаимодействует не только с электронами и различными линейными дефектами кристаллической решётки. Протоны могут захватываться и взаимодействовать с объёмными дефектами — постоянными примесями, легирующими элементами, неметаллическими включениями и др. Например, установлено [15], что водород с примесями образует соединения  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{P}_5\text{H}_4$  и др. Кроме этого, водород может взаимодействовать с углеродом, находящимся в растворе ( $4\text{H} + \text{C} = \text{CH}_4$ ), так и 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 примерно 20 и 34 ккал/моль [15].

Присутствующие в стали неметаллические включения (силикаты, глинозём, кремнезём, нитриды титана) также являются ловушками водорода и его взаимодействия с включениями приводят к образованию коллекторов, хрупких химических соединений и других различных концентраторов напряжения [12]. Все эти реакции также происходят с образованием тепловой энергии.

В связи с этим имеются все основания полагать, что основная роль в облегчении процессов деформаций и разрушения металлов в СОТС принадлежит водороду, входящему в состав технологической среды, взаимодействие электрически активных частиц которого с реальной структурой деформируемого металла приводит к выделению тепловой энергии. Следовательно, протоны водорода изменяют прочность материала, непосредственно взаимодействуя с атомами металла, и косвенно за счёт тепловой энергии, образующейся вследствие их рекомбинации.

В целом, таким образом, каждый из отдельно рассмотренных процессов контактного взаимодействия электрически активных частиц водорода с реальной электрически активной структурой материала, образующейся в момент его разрушения, а также инициируемые ими вспышки тепловой энергии сопровождаются различными микромасштабными изменениями физико-механических свойств металла. Комплексное влияние этих процессов приводит к макромасштабным изменениям и облегчению макропроцессов деформации и разрушения металла.

Степень влияния каждого из отдельных механизмов зависит от

состава СОТС, физико-механических свойств обрабатываемого материала, а также от режима его механической обработки, контролирующего эффективность ионизаторов и термоэлектродвижущую силу (ТЭДС). Здесь важно отметить, что перечисленные факторы обуславливают только возможность протекания предлагаемых механизмов в системе металл-водород. В практическом значении этих взаимодействий важную роль играет скорость химического превращения исходной поверхностно-активной среды в радикально-активную, отчего во многом зависит конечный результат действия среды, т.е. её эффективность. Как было показано, на микроскопическом уровне теория строения атомов и молекул и их взаимодействия может дать заключение о возможности и скорости элементарного акта химического взаимодействия. Однако в рассматриваемом примере, — механической обработке металла резанием в СОТС, — огромное влияние на скорость химических реакций имеют физические факторы: большие массы реагирующих веществ, теплоотвод через поверхности реакционной зоны, скорость подвода реагентов извне, уровень электромагнитного поля в системе станок-инструмент и др. Очевидно, что ответ на эти вопросы может быть получен будущими исследованиями.

## **5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ХОДЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

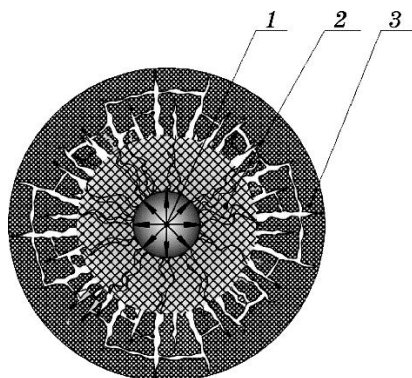
Развитие представлений о механизме влияния водорода на процесс резания (или вообще на разрушение) осуществляется путём выявления роли водорода на различных стадиях проявления отдельных механизмов процесса разрушения в локальной области перед кончиком трещины, начиная от развития упругой деформации до распространения разрушающей трещины.

Характер разрушения металла в условиях резания, когда резец при большой скорости рабочего движения в результате высокого контактного давления лезвия срезает лишь незначительный слой материала, существенно отличается от характера разрушения при статических или динамических стандартных механических испытаниях. Это различие связано с тем, что физические условия разрушения материала при резании характеризуются значительно более высокими значениями параметров, чем у большинства других процессов, сопровождаемых деформацией. Например, при резании, в зоне пластической деформации действуют большие сжимающие напряжения, которые препятствуют разрыву материала, несмотря на то, что относительная деформация превосходит значение, при котором разрушается материал при растяжении [22].

Специфические условия, в которых происходит процесс разрушения при резании, дают основание полагать, что в этом случае должна наблюдаться внешняя аналогия нарастания механических напряжений в теле со взрывом заряда взрывчатого вещества [15]. В том и другом случаях имеется импульс давления, создающий разрывающее напряжение, упругую и пластическую деформации, нарастающие с большой скоростью только в отдельных участках материала (рис. 2). Вместе с тем, в отличие от взрыва, при резании давление резца вызывает сложное распределение внутренних сил.

При вдавливании клина инструмента в заготовку начинается распространение волны сжатия, идущей с большой скоростью. После достижения максимума волн, в материале достигается максимум деформации, и в результате скольжения слоёв материала друг относительно друга появляются трещины, идущие от центра радиуса закругления острия лезвия. При удалении от центра напряжения сжатия уменьшаются, и разрушение тела прекращается. Однако, после прохождения волны сжатия, под действием сил упругости сместившиеся слои возвращаются к центру, возникают напряжения растяжения, в результате которых в металле появляются кольцевые трещины (рис. 2). Таким образом, в непосредственной близости к острию клина происходит измельчение и дробление материала.

Как известно, идеально, вокруг трещины возникает ряд областей, причём каждая из них даёт граничные условия для следующей. На больших расстояниях, когда действуют приложенные напряжения номинальной величины, материал находится в упругой области. Ближе к вершине трещины растёт концентрация



**Рис. 2.** Распределение трещин после теплового удара: 1 — зона вспышки химического превращения, 2 — зона раздавливания материала, 3 — распределение трещин в зоне растрескивания [29].<sup>2</sup>

напряжений. Ещё ближе имеется пластическая область. Наконец, следует область, где материал становится неоднородным, сначала вследствие границ зёрен, а затем субзёрен, дислокаций и атомов [24].

Влияние протона на эти различные этапы процесса разрушения обусловлено его взаимодействием с реальной структурой металла, что сначала будет отражаться на реакции материала в связи с наличием (или вновь зарождением) в нём острых трещин в присутствии водорода, а затем и на окончательной форме проявления этих эффектов — существенном снижении суммарных сил, действующих на срезаемый слой. Как было показано в предыдущем разделе, в системе металл–водород существует многообразие процессов взаимодействия водорода с реальной металлической структурой, возникающей при данном варианте разрушения, что в конечном совокупном результате оказывает влияние на степень снижения механических свойств металла. В зависимости от специфики интенсивности потока протонов, конкретной взаимодействующей системы и внешних, накладываемых на эти процессы, условий, в которых они протекают, облегчение процессов деформации и разрушения металла под влиянием водорода может иметь либо незначительное, либо, наоборот, преимущественное или даже исключительное развитие.

Разрушение металла при резании, в основном, носит квазихрупкий характер. Поэтому когда вскрытие быстрой трещины происходит вследствие прямого разрыва связей в её устье, что характерно при хрупком разрушении, основное влияние на изменение прочности материала будут оказывать поверхностные процессы взаимодействия с водородом. И, наоборот, когда преобладает пластический характер разрушения, возрастает влияние протонов в объёме металла в зоне максимальной концентрации напряжений у вершины трещины. Следовательно, если скорость энергоподпитывания трещины может быть настолько велика, что компенсирует затраты на пластическую деформацию, то разрушение, будет обладать всеми видимыми особенностями хрупкого разрушения. В этом случае решающее влияние на рост трещины, а значит и на энергозатраты процесса резания, будут оказывать поверхностные процессы взаимодействия водорода с металлом на кончике трещины. Поэтому при механической обработке резанием в водородосодержащих средах высокопрочных, закалённых сталей влияние поверхностных процессов взаимодействия среды становится более заметным.

То обстоятельство, что при разрядке протона происходят тепловые микровзрывы, в результате чего в атомных группировках металла температура может значительно превышать температуру его плавления, находит подтверждение в теории неравновесных

состояний и термодинамических флуктуаций, а также согласуется с известными данными о влиянии на фазовые и структурные превращения кратковременного (импульсного) нагрева железоуглеродистых сплавов, находящихся в метастабильных состояниях [30].

Согласно существующим представлениям на атомно-молекулярном уровне, основным фактором процесса разрушения является тепловое движение. Поскольку разрывы сил связей локализованы в основном в местах концентраций напряжений разного происхождения, но главным образом в микрообластях, прилегающих к вершинам трещин, то механизм разрушения твёрдого тела следует связывать с совместным действием на связи тепловых колебаний и напряжений [31]. Известно, что вследствие тепловой вспышки, образующейся в результате рекомбинации протона, увеличиваются фонон-атомные взаимодействия атомов, которые могут приобретать кинетическую энергию, достаточную для разрыва связи [30]. Таким образом в общем балансе энергетических затрат на разрыв межатомных связей металла происходит существенное снижение механической составляющей, поскольку в большинстве случаев образующаяся дополнительная тепловая энергия практически совпадает с энергией химической связи. В дальнейшем квазинезависимые акты разрыва отдельных связей, локализованные в зоне 1 на рис. 2, в определённых условиях становятся объёмными и повышают температуру в месте отделения частиц металла от поверхности заготовки. Во многих случаях эта температура может значительно превышать температуру плавления материала. В связи с этим можно считать, что процесс локализованной пластической деформации, доведённой до разрушения, а затем и потери устойчивости твёрдого тела вызван параллельным ходом термической и механической энергии.

Таким образом, в проблеме механоплазменного эффекта особое место занимает тепловой импульс передаваемый металлу вследствие рекомбинации протона.

В практическом значении эффективность проявления механоплазменного эффекта, а значит, и снижения энергосиловых затрат на резание, будет зависеть от следующих факторов: 1) скорости образования и поступления углеводородной газовой смеси в реакционную щель, её концентрации и состава; 2) скорости химического превращения газовой смеси в водородную плазму; 3) скорости и вектора диффузии ионизированного водорода как к вершине трещины разрушения, так и непосредственно в зону преодоления сцепления между атомами.

Чрезвычайно важную роль в проявлении механоплазменного эффекта играет состав исходной поверхностно-активной среды (СОТС), поскольку от свойства химических соединений и ве-

ществ, входящих в состав СОТС, во многом зависит возможность возникновения плазменного эффекта и степень его проявления.

Представления о физико-химической природе активации исходной среды до плазменного состояния, вызывающего механо-плазменный эффект подтверждаются не только современными теоретическими работами в смежных научных областях, но и известными практическими результатами их использования. Так, например, если ввести в поток ионизированного водорода металлическую пластинку, то её поверхность быстро расплавится и образуется сварочная ванна. По измерениям и теоретическим расчётам температура пламени в этом случае составляет около 3700°C. На этом принципе разработан промышленный способ «атомно-водородная сварка». Получила распространение также технология плазменной резки металла, когда узкий поток ионизированного водорода направляется на металл, расплавляя его в тонком слое.

В целом, таким образом, механическое воздействие на металл, обрабатываемый с применением СОТС, сопровождается химические превращения среды с образованием водородной плазмы (плазменный эффект), различные взаимодействия которой с реальной структурой металла вызывают значительное облегчение процессов деформации и разрушения. В этом случае особое значение приобретают тепловые процессы, которые способны не только привести к оплавлению материала, но и, когда плотность плазменного пучка недостаточна, отдельными тепловыми импульсами и высокой скоростью их приложения способны в определённых условиях приводить к возникновению структурных изменений, больших напряжений и охрупчиванию материала [12]. Кстати сказать, процессы влияния локальных тепловых вспышек в стали на изменения её свойств практически не изучены. Тем не менее, известны исследования по влиянию скоростного нагрева на образование аустенита [30]. Авторами этих исследований было установлено, что, когда тепловая энергия создаётся непосредственно в реагирующем объёме, а не поступает к нему из периферийных областей за счёт теплопроводности, формирование структур в этом объёме происходит в полном соответствии с механизмом фазовых превращений, при подводимой тепловой энергии путём теплопроводности. Вероятно, импульсная вспышка тепловой энергии в зоне разрушения при резании в полимерсодержащей СОЖ приводит к аналогичным результатам, полученным при скоростном электронагреве.

Необходимо также отметить, что после выхода заготовки из зоны разрушения может происходить отпуск слоёв закалённой стали, различные фазовые превращения углеродистого мартенсита, релаксация напряжений закалённой и отпущенной стали, что

существенно влияет на резание металла.

Таким образом, можно полагать, что выяснение природы влияния импульсного теплового нагрева, возникающего в процессе резания в СОТС, может привести не только к более полному пониманию механизма процессов разрушения, но и к обоснованию новых методов упрочнения обрабатываемых деталей в процессе резания путём МПО.

Суммируя изложенные результаты важно отметить, что повышение температуры в зоне резания, в связи с взаимодействиями водорода с деформируемым металлом, будет способствовать:

- увеличению кинетической энергии атомов, в связи с чем ускоряется перемещение точечных дефектов и создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества;
- облегчению процесса скольжения кристаллов;
- освобождению дислокаций от примесных атмосфер, что снизит напряжение трения кристалла, а, следовательно, и напряжение, необходимое для начала движений дислокаций;
- увеличению скорости перемещения дислокаций;
- усилению интенсивности силовых полей атомов металла, способствующих втягиванию протона в электронные оболочки ионов железа вплоть до самых глубоких уровней;
- увеличению концентрации водорода в ловушках, что может привести к образованию кластеров и их возможному переходу в атомарно острую трещину;
- изменению характера разрушения металла в связи с тем, что межкристаллические связи могут оказываться слабее самих зёрен, и разрушение в этом случае происходит по границам зёрен, а не внутри их.

Важно отметить, что эффективность механоплазменной обработки подтверждается результатами промышленных испытаний при формообразовании металла не только резанием, но и всеми другими видами механической обработки металла (резанием, давлением, при шлифовании и полировании), а также шлифовании и полировании силикатных стёкол, резании полупроводниковых материалов, бурении горных пород, измельчении силикатных систем и др. [11].

Например, при МПО суммарные энергетические затраты даже с увеличением параметров резания снижаются до 40% с одновременным увеличением износостойкости инструмента более чем на порядок. При этом выдерживается заданная точность, улучшается чистота обработанной поверхности, повышается эксплуатационная долговечность изделий. Так, предел усталости стали 9ХС на воздухе после механоплазменной обработки увеличивается на 20%, а предел коррозионной усталости — на 40%. Усилие волочения проволоки 1Х18Н9Т в полимерсодержащей смазке с



диаметра 46 мкм на диаметр 44 мкм снижается примерно в 10 раз при одновременном увеличении скорости волочения в 4,5 раза. При этом увеличивается износостойкость алмазного инструмента, улучшается качество продукции. Производительность станков для изготовления стальных труб методами продольной и поперечной холодной прокатки увеличивается на 20–25% при добавлении в применяемую смазку полимера. Результаты работы на 5 буровых установках при бурении с применением обычно применяемой смеси гудронов, а также в этой же среде, но с полимерной добавкой показали, что, когда реализуется МПО, технико-экономические показатели улучшаются: средний расход мощности снизился в 2 раза; при этом механическая скорость бурения возросла на 20%, проходка на одну коронку увеличилась на 3,2 м/час, а удельный расход алмазов уменьшился на 25% [11].

Данная статья ограничена рассмотрением только основных взаимодействий в системе металл–водород, ведущих к изменению, в основном, механических свойств металла. Дальнейшее выявление роли отдельных механизмов таких взаимодействий на фоне физико-химических процессов, возникающих в результате разрушения металла, — необходимый шаг к сознательному изменению его свойств с целью получения нужных критических параметров и созданию высокоэффективных способов механической обработки твёрдых тел.

## 6. ВЫВОДЫ

Предложен механизм облегчения деформации и разрушения металла в процессе резания в поверхностно-активных смазочно-охлаждающих технологических средствах, содержащих различные растворимые и эмульгированные компоненты.

Установлено, что обратимое (адсорбционное) взаимодействие тела с технологической средой не оказывает заметное влияние на энергосиловые параметры резания. Такие среды незначительно уменьшают работу, затрачиваемую на процесс резания, вследствие снижения силы трения по передней и задней поверхностям инструмента.

Установлено, что основное снижение энергосиловых параметров при резании металла в СОТС вызвано контактными взаимодействиями частиц водорода, обладающих положительным электрическим зарядом, с новой электрически активной реальной структурой тела, возникающей вследствие механического процесса.

На основании обобщения исследований, посвящённых различным физико-химическим явлениям наблюдаемых в твёрдых те-

лах в процессе разрушения, предложена модель активации поверхностно-активного технологического средства вплоть до образования водородной плазмы. Показано, что активация исходной водородосодержащей среды инициируется и протекает вследствие следующих физико-химических процессов:

— теплового разложения водородосодержащих соединений и веществ на горячих поверхностях стружки и инструмента, что вызывает образование углерода и водорода в атомарной и другой активной форме (радикалы, ионы, ион-радикалы), а также гомологического ряда алифатических предельных углеводородов;

— контактных взаимодействий водорода и газовой смеси с электрически активными свежеобразованными поверхностями трещины и реакционной зоны;

— соударения в полости реакционной зоны заряженных частиц между собой, с электронной лавиной, испускаемой из вершины трещины, а также взаимодействия заряженных частиц с нейтральными атомами водорода, что приводит к увеличению степени ионизации газа водорода.

Установлено, что синтез наноматериалов и химических элементов типа водорода, являющихся объектами, вызывающими эффекты облегчения деформации и разрушения при резании в СОТС, осуществляется в щелевом пространстве между клином инструмента и вершиной трещины. Показано, что свойства элементарных частиц отличаются от свойств свободных атомов или молекул чрезвычайно высокой химической активностью.

Установлено, что исключительно важная роль в щелевом пространстве принадлежит трещине. Она играет роль спускового устройства, включающего в работу в момент роста трещины все химические процессы, и контролирует возможность и эффективность МПО.

Показано, что эффекты, связанные с влиянием  $H^+$  на механические свойства металла, многообразны в своих микроскопических проявлениях, однако в конечных макроскопических результатах они всегда вызывают облегчение процессов деформации и разрушения и снижение энергозатрат на процесс механической обработки.

Основную роль в облегчении процесса резания в поверхностно-активных технологических средах играет тепловой эффект, возникающий вследствие контактных взаимодействий положительно заряженных частиц водорода с реальной электрически активной структурой твёрдого тела, образующейся в ходе механического процесса.

Улучшение обрабатываемости металла в СОТС вызвано совместным действием внешней механической и дополнительной внутренней тепловой энергии.

Образование плазмы возможно при наличии в СОТС высокомолекулярного соединения определённого состава и концентрации.

Показано, что при МПО возможно программируемое насыщение обработанной поверхности легирующими элементами.

Подтверждена практическими результатами возможность использования механоплазменного эффекта в нанотехнологии обработки деталей машин с одновременным повышением их эксплуатационной долговечности, а также других твёрдых тел путём введения в состав СОТС высокомолекулярного соединения, например полиэтилена или поливинилхлорида, которые при низкой энергии активации пиролиза дают высокий выход водорода в различных активных формах.

В заключение отметим, что сегодня интенсификация промышленного производства, как никогда прежде, требует эффективной помощи науки и внедрения её достижений в практику. Важность поставленной в статье научно-технической проблемы и экономический эффект, который может быть получен от её решения, приводят также к постановке новых научных задач, решение которых должно привести к созданию комплексного процесса формообразования металлических изделий, обеспечивающего возможность в одном технологическом цикле осуществить механическую, физико-химическую и термохимическую обработку.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Ребиндер, Э. С. Липман, *Исследования в области прикладной физико-химии поверхностных явлений* (Москва: ОНТИ: 1936), с. 225.
2. В. И. Лихтман, Е. Ф. Щукин, П. А. Ребиндер, *Физико-химическая механика* (Москва: Изд. АН СССР: 1962).
3. Eu. D. Shcukin and A. S. Zelenev, *Physical-Chemical Mechanics of Disperse Systems and Materials* (London–New York: CRC Press: 2016); <https://doi.org/10.1201/b19054-11>.
4. Е. Д. Щукин, В. И. Савенко, А. И. Малкин, *Лекции по физико-химической механике* (Москва: Изд. NOBEL PRESS: 2015).
5. E. D. Shcukin, *Nucleation and Crystal Growth in Cements. Encyclopaedia of Colloid and Interface Science* (Ed. T. Tadros) (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2013), p.783.
6. E. Shcukin, *Physical-Chemical Mechanics of Solid Surfaces. Encyclopaedia of Surfaces and Colloid Science Edition* (New York: Taylor and Francis: 2012), p. 1.
7. Г. В. Карпенко, Р. И. Крипякевич, *Влияние водорода на свойства сталей* (Москва: Металлургиздат: 1962).
8. Г. В. Карпенко, А. К. Литвин, А. И. Сошко, *Физико-химическая механика материалов*, 4: 87 (1973).
9. В. И. Ткачев, А. К. Литвин, А. И. Сошко, *Проблемы прочности*, 12: 77 (1972).
10. В. С. Федченко, А. И. Радкевич, Л. М. Карвацкий, *Физико-химическая*

- механика материалов* (Киев: Наукова думка: 1976).
11. А. И. Сошко, В. А. Сошко, *Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла* (Одесса–Херсон: Изд. Олди-плюс: 2008), тт. 1, 2; [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-155-159](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-155-159).
  12. А. И. Сошко, В. А. Сошко, *Металлофизика и новейшие технологии*, 1: 117 (2017); DOI: 10.15407/mfint.39.01.0117.
  13. В. А. Сошко, А. И. Сошко, *Механохимическая обработка металлов* (Saarbrücken, BRD: LAMBERT Academic Publishing: 2015); [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-160-167](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-160-167).
  14. Б. Б. Чечулин, Л. С. Мороз, *Водородная хрупкость металлов* (Москва: Металлургия: 1967).
  15. Н. А. Галактионова, *Водород в металлах* (Москва: Металлургия: 1967).
  16. Р. Кристи, А. М. Питти, *Строение вещества: введение в современную физику* (Москва: Наука: 1969).
  17. M. Born and R. Furth, *Proc. Comb. Phil. Soc.*, **36**: 454 (1940); <https://doi.org/10.1017/S0305004100021745>.
  18. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник* (Ред. С. Г. Энтелис, Э. М. Берлинер) (Москва: Машиностроение: 1986).
  19. А. С. Ахматов, *Молекулярная физика граничного трения* (Москва: Наука: 1963).
  20. Т. И. Трофимова, *Курс физики* (Москва: Высшая школа: 2000).
  21. *Физический энциклопедический словарь* (Москва: Наука: 1962), т. 2, с. 279.
  22. В. К. Старков, *Дислокационные представления о резании металлов* (Москва: Машиностроение: 1979).
  23. *Водород в металлах* (Ред. Г. Алефельд, И. Фёлькль) (Москва: Мир: 1981).
  24. Ф. Макклиток, А. Аргон, *Деформация и разрушение материалов* (Москва: Мир: 1970).
  25. В. Д. Кузнецов, *Физика твердого тела. 2-е изд. Т. 1* (при участии В. А. Жданова, Н. Ф. Кунина, Д. Д. Саратовкина) (Томск: Красное знамя: 1937).
  26. А. А. Писарев, Е. Д. Цветков, С. С. Маренков, *Проницаемость водорода через металлы* (Москва: Изд. МИФИ: 2008).
  27. Б. А. Колачев, *Водородная хрупкость цветных металлов* (Москва: Металлургия: 1966).
  28. А. Коттрелл, *Механические свойства новых материалов: Сборник* (Москва: Мир: 1966), с. 267.
  29. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, *Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков* (Москва: Высшая школа: 1966).
  30. В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, В. И. Трефилов, *Физические основы электротермического упрочнения стали* (Киев: Наукова думка: 1973).
  31. Г. М. Бартнев, Ю. В. Зеленев, *Физика и механика полимеров* (Москва: Высшая школа: 1983).

## REFERENCES

1. P. A. Reh binder and Eh. S. Lipman, *Issledovaniya v Oblasti Prikladnoy*

- Fiziko-Khimii Poverkhnostnykh Yavleniy* (Moscow: ONTP: 1936), p. 225 (in Russian).
2. V. I. Likhtman, E. F. Shchukin, and P. A. Rehbinder, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika* (Moscow: Izd. AN SSSR: 1962) (in Russian).
  3. Eu. D. Shcukin and A. S. Zelenev, *Physical-Chemical Mechanics of Disperse Systems and Materials* (London–New York: CRC Press: 2016); <https://doi.org/10.1201/b19054-11>.
  4. E. D. Shhukin, V. I. Savenko, and A. I. Malkin, *Lektsii po Fiziko-Khimicheskoy Mekhanike* (Moscow: Izd. NOBEL PRESS: 2015) (in Russian).
  5. E. D. Shcukin, *Nucleation and Crystal Growth in Cements. Encyclopaedia of Colloid and Interface Science* (Ed. T. Tadros) (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2013), p.783.
  6. E. Shcukin, *Physical-Chemical Mechanics of Solid Surfaces. Encyclopaedia of Surfaces and Colloid Science Edition* (New York: Taylor and Francis: 2012), p. 1.
  7. G. V. Karpenko and R. I. Kripyakevich, *Vliyanie Vodoroda na Svoistva Staley* (Moscow: Metallurgizdat: 1962) (in Russian).
  8. G. V. Karpenko, A. K. Litvin, and A. I. Soshko, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, 4: 87 (1973) (in Russian).
  9. V. I. Tkachev, A. K. Litvin, and A. I. Soshko, *Problemy Prochnosti*, 12: 77 (1972) (in Russian).
  10. V. S. Fedchenko, A. I. Radkevich, and L. M. Karvatskiy, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov* (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
  11. A. I. Soshko and V. A. Soshko, *Smazochno-Okhlazhdayushchie Sredstva v Mekhanicheskoy Obrabotke Metalla* (Odessa–Kherson: Izd. Oldi-plyus: 2008), vols. 1, 2 (in Russian); [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-155-159](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-155-159).
  12. A. I. Soshko and V. A. Soshko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 1: 117 (2017) (in Russian); DOI: 10.15407/mfint.39.01.0117.
  13. V. A. Soshko and A. I. Soshko, *Mekhanokhimicheskaya Obrabotka Metallov* (Saarbrücken, BRD: LAMBERT Academic Publishing: 2015) (in Russian); [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-160-167](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-160-167).
  14. B. B. Chechulin and L. S. Moroz, *Vodorodnaya Khrupkost' Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1967) (in Russian).
  15. N. A. Galaktionova, *Vodorod v Metallah* (Moscow: Metallurgiya: 1967) (in Russian).
  16. R. W. Christy and A. Pytte, *Stroenie Veshchestva: Vvedenie v Sovremennuyu Fiziku* (Moscow: Nauka: 1969) (Russian translation).
  17. M. Born and R. Furth, *Proc. Comb. Phil. Soc.*, 36: 454 (1940); <https://doi.org/10.1017/S0305004100021745>.
  18. *Smazochno-Okhlazhdayushchie Tekhnologicheskie Sredstva dlya Obrabotki Metallov Rezanem: Spravochnik* (Eds. S. G. Ehntelis, Eh. M. Berliner) (Moscow: Mashinostroenie: 1986) (in Russian).
  19. A. S. Akhmatov, *Molekulyarnaya Fizika Granichnogo Treniya* (Moscow: Nauka: 1963) (in Russian).
  20. T. I. Trofimova, *Kurs Fiziki* (Moscow: Vysshaya Shkola: 2000) (in Russian).
  21. *Fizicheskiy Ehntsiklopedicheskiy Slovar'* (Moscow: Nauka: 1962), vol. 2, p. 279 (in Russian).
  22. V. K. Starkov, *Dislokatsionnyye Predstavleniya o Rezanii Metallov* (Moscow:

- Mashinostroenie: 1979) (in Russian).
23. *Vodorod v Metallakh* (Eds. G. Alefeld and J. Völkl) (Moscow: Mir: 1981) (Russian translation).
  24. F. A. McClintock and A. S. Argon, *Deformatsiya i Razrushenie Materialov* (Moscow: Mir: 1970) (Russian translation).
  25. V. D. Kuznetsov, *Fizika Tverdogo Tela. 2<sup>nd</sup> Ed. Vol. 1* (with the assistance of V. A. Zhdanov, N. F. Kunin, and D. D. Saratovkin) (Tomsk: Krasnoye Znamya: 1937) (in Russian).
  26. A. A. Pisarev, E. D. Tsvetkov, and S. S. Marenkov, *Pronitsayemost' Vodoroda Cherez Metally* (Moscow: Izd. MEPhI: 2008) (in Russian).
  27. B. A. Kolachev, *Vodorodnaya Khrupkost' Tsvetnykh Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1966) (in Russian).
  28. A. Cottrell, *Mekhanicheskie Svoystva Novykh Materialov: Sbornik* (Moscow: Mir: 1966), p. 267 (Russian translation).
  29. A. A. Vorobiev and G. A. Vorobiev, *Ehlektricheskiy Proboy i Razrushenie Tverdykh Dielektrikov* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1966) (in Russian).
  30. V. N. Gridnev, Yu. Ya. Meshkov, and V. I. Trefilov, *Fizicheskie Osnovy Ehlektrotermicheskogo Uprochneniya Stali* (Kiev: Naukova Dumka: 1973) (in Russian).
  31. G. M. Bartenev and Yu. V. Zelenev, *Fizika i Mekhanika Polimerov* (Moscow: Vysshaya Shkola: 1983) (in Russian).

---

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

<sup>1</sup> Fig. 1. Schematic representation of the process of formation of hydrogen plasma in the slotted space: (a) the zone of chip formation: 1—billet, 2—zone of plastic deformation, (б) diagram of the plasma flow in the slit space: 1—blank, 2—tool, 3—slit space, 4—the tip of the crack, 5—area of non-uniform material, 6—zone of advanced plastic deformation; (в) scheme of impact ionization as a result of collisions and interactions: 1—electrons with neutral molecules and neutral atoms, followed by the formation of secondary electrons and positive ions, 2—secondary electrons with atoms, 3—positive ions with atoms, followed by the formation of a photon, 4—photon with a neutral atom and its ionization, 5—positive ions with atoms and their ionization, 6—the flow of ions in atoms.

<sup>2</sup> Fig. 2. Crack distribution after thermal shock: 1—the flash zone of chemical transformation; 2—the crush area of the material; 3—distribution of cracks in the cracking zone [29].