

УДК 672.11, 544.034

## О ВЛИЯНИИ СМАЗОЧНО- ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

**А. И. Сошко**

д-р техн. наук

[a.soshko@gmail.com](mailto:a.soshko@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-2135-5674

**В. А. Сошко**

канд. техн. наук

[soshking@gmail.com](mailto:soshking@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1788-0855

**И. П. Симинченко**

[siminchenko@gmail.com](mailto:siminchenko@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7567-6062

Херсонский национальный  
технический университет,  
73008, Украина, г. Херсон,  
Бериславское шоссе, 24

*Показано влияние смазочно-охлаждающих технологических средств на разрушение металла в процессе резания. Установлено, что наиболее эффективными присадками к смазывающе-охлаждающим технологическим средствам (СОТС) являются алифатические предельные полимеры – полиэтилен и поливинилхлорид. В рамках представлений о химической активации сред, а также накопившихся собственных экспериментальных материалов исследований проведены исследования по качественному описанию усложненных моделей, связанных с реальной микроструктурой материала и количественным измерением влияния металло-водородных систем. Рассмотрены различные аспекты проблемы влияния механической энергии и водорода на перестройку кристаллической решетки и разрывы сил межатомных связей, возникающих в ультрамикроскопических областях. Освещены вопросы кинетики входа протона в глубину металла в системе металл–водород и его взаимодействие с металлом непосредственно в области перестройки и разрыва сил связей между атомами на конечном проявление влияния среды на процесс резания. В статье описаны процессы и явления, которые проходят ниже границы между сильно деформируемым металлом (стружкой) и остальной массой металла обрабатываемой заготовки и особенности процессов транспорта водорода из плазмы в очаг разрушения металла. Установлено, что в микрообъеме материала тепловая энергия, образующаяся в связи с контактными взаимодействиями электрически активных частиц водорода с электрически активной реальной структурой металла, увеличивает частоту тепловых колебаний атомов материала и вероятность их разрыва. Действуя совместно с механической, они облегчают процессы деформации и разрушения и снижают энергетические затраты на резание металла в различных углеводородных СОТС. Отмечено, что присутствие водорода в стружке и в обрабатываемой поверхности было зарегистрировано при резании металла в любой водородосодержащей среде, даже в воде. Однако концентрация водорода в металле, при его обработке в среде с добавкой полимера, примерно на два порядка выше, чем в низкомолекулярной. Именно этот факт обуславливает значительное преимущество СОТС с полимерными добавками.*

**Ключевые слова:** водород, металл, обработка, атом, протон, смазывающе-охлаждающие технологические средства.

### Введение

Исследования по изучению механизма влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на процессы разрушения металлов при их механической обработке резанием позволили установить, что облегчение деформации и разрушения в таких условиях осуществляется вследствие взаимодействия положительно заряженных частиц водорода с электрически активной реальной структурой материала, образующейся в связи с механическим воздействием [1, 2]. Согласно этим представлениям, образование ионизированного водорода происходит в условиях вскрытия новой поверхности в зоне разрушения металла вследствие активации, как низко-, так и высокомолекулярных веществ, входящих в состав СОТС. Отмечается, что процессы активации протекают под влиянием многочисленных физико-химических явлений, имеющих квантовую природу и являющихся постоянным спутником актов перестройки и разрыва межатомных связей материала. Важно отметить также, что наличие в составе СОТС высокомолекулярного соединения многократно повышает как скорость активационных процессов, так и выход конечного продукта (водорода) [1, 2].

В целом следует констатировать, что к настоящему времени по рассматриваемой проблеме хотя и проделана определенная работа, однако по-прежнему очень важны дальнейшие исследования по качественному описанию усложненных моделей, связанных с реальной микроструктурой материала, а затем и количественные измерения этих металло-водородных систем.

© А. И. Сошко, В. А. Сошко, И. П. Симинченко, 2019

Чтобы качественно увязать макро- и микропредставления о различных процессах и явлениях, возникающих в ультрамикроскопических областях, где протекает перестройка кристаллической решетки и разрыв сил межатомных связей вследствие совокупного влияния механической энергии и водорода, рассмотрим только некоторые основные аспекты этой проблемы.

С одной стороны, это особенности поведения высокомолекулярного соединения (полимера), входящего в состав СОТС, и его низкомолекулярной модели в химических процессах их пиролиза, что отражается не только на скорости концентрации образующейся радикально активной газовой смеси, но и на конечном результате – эффективности действия такой СОТС.

В подавляющем большинстве все современные СОТС, без которых невозможно осуществить процесс получения деталей с заданной точностью и качеством поверхности, представляют собой углеводороды, молекулы которых состоят из атомов только двух элементов – углерода и водорода. Другие классы органических соединений, обычно применяемые для получения СОТС, также состоят из углеводородов, в молекулах которых один или несколько атомов водорода заменены различными другими атомными группами. В отличие от низкомолекулярных веществ, полимеры, которые для повышения эффективности СОТС вводятся в их состав в качестве присадки, также являются органическими соединениями, однако их макромолекулярные цепи состоят из молекул их низкомолекулярных аналогов, соединяемых друг с другом в макроцепочку, и молекулярная масса полимеров может достигать многих миллионов.

Установлено [3], что наиболее эффективными присадками к СОТС являются алифатические предельные полимеры – полиэтилен (ПЭ) и поливинилхлорид (ПВХ). Кроме этого, такие полимеры дают возможность проследить существенные отличия в реакционной способности низко- и высокомолекулярных соединений аналогичной химической природы, входящих в состав СОТС, но с постепенно возрастающей молекулярной массой (например, от низкомолекулярного этилена ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) до высокомолекулярного ПЭ ( $-\text{C}_n\text{H}_{2n}-$ ), молекулярная масса которого может превышать  $100 \cdot 10^3$ , а его состав отвечает одной общей формуле с постоянной гомологической разностью  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ).

Методическая привлекательность этих веществ состоит еще и в том, что ПЭ, в отличие, например, от гептана, обладая невысокой термоустойчивостью, легко разлагается с образованием активных форм водорода и углерода [3]. Высокая концентрация водорода в области разрушения оказывает сильное влияние на перестройку и разрыв межатомных связей, что вызывает по сравнению с гептаном радикальное снижение прочности.

С другой стороны, в рассматриваемой системе металл – водород интересна кинетика «входа» протона в глубину металла, что осуществляется со скоростью, значительно превышающей скорость деформирования тела в процессе резания. Выяснение природы этого явления представляет особый интерес, поскольку температура стружки в момент ее отделения от заготовки так же, как и парциальное давление водорода вблизи поверхности, слишком малы, чтобы водород успел проникнуть достаточно глубоко в приповерхностные слои металла.

Важной проблемой является модель взаимодействия водорода с металлом непосредственно в области перестройки и разрыва сил связей между атомами, которая наиболее адекватно соответствует энергетическим затратам на вскрытие новой поверхности, то есть на конечное проявление влияния среды на процесс резания.

Как нам представляется, анализ в рамках представлений о химической активации сред [4–8] и экспериментальные материалы собственных исследований [1, 2] являются достаточно надежными для того, чтобы объяснить отличия в реакционной способности различных веществ и соединений, обычно составляющих СОТС.

Первое отличие состоит в том, что энергия разрыва химических связей низкомолекулярных органических соединений значительно выше, чем высокомолекулярных, что вызвано следующим.

Как уже отмечалось, термодеструкция ПЭ, макромолекулы которого состоят только из атомов углерода и водорода, происходит в интервале температур ( $290\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$ ), которые легко достигаются в зоне резания. В то же время пиролиз гептана, его модельного аналога, молекулу которого составляют также атомы углерода и водорода, начинается при температуре выше  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , которая не во всех случаях образуется в зоне резания. Если сопоставить в сравнительных единицах значение энергии, которую необходимо затратить для отрыва атома водорода в макромолекуле ПЭ и молекуле гептана, то она составит 3 и 11 единиц соответственно [3].

Второе отличие связано с механизмом развала молекул: низкомолекулярные органические соединения при разрыве молекул не дают радикально активных продуктов, тогда как уже на первой стадии распада макроцепи полимера образуются промежуточные радикальные продукты, являющиеся дополнительным источником образования новых радикально активных веществ. Более того, их дальнейшая химическая активация может приобрести самоускоряющийся и даже лавинообразный характер с нарастанием новых активных частиц, в том числе и ионизированного водорода [3, 5–7]. Заметим, что в данном случае, при малых давлениях в реакционной зоне, цепные реакции развиваются с конечной постоянной скоростью без взрыва (воспламенения).

Чрезвычайно важно отметить, что присутствие водорода в стружке и в обрабатываемой поверхности было зарегистрировано при резании металла в любой водородосодержащей среде, даже в воде [1, 2]. Однако концентрация водорода в металле при его обработке в среде с добавкой полимера примерно на два порядка выше, чем в низкомолекулярной. Именно этот факт обуславливает значительное преимущество СОТС с полимерными добавками, связанное со специфическим термическим распадом макроцепи полимера. Это дает возможность получить в зоне резания большую концентрацию слабо ионизированного газа, состоящего из молекулярного и атомарного водорода, а также ионов, ион-радикалов, радикалов.

Являясь промежуточным продуктом, активированная водородосодержащая газовая смесь в дальнейшем проникает в реакционную щель. Такая газовая смесь непрерывно поступает и накапливается в пространстве, ограниченного вершиной трещины, ее «берегами» и режущей кромкой инструмента

Именно в этой реакционной зоне происходит окончательное формирование водородной плазмы. Ионизаторами этого процесса являются ювенильные каталитически активные поверхности, экзотермическая эмиссия и самоускоряющиеся газоразрядные процессы.

Модель реакционной зоны, представленная на рисунке, формируется в процессе резания между клином инструмента и ультрамикроскопической областью обрабатываемого металла перед вершиной трещины, где сконцентрированы высокие локальные напряжения, вызывающие зарождение и движение дислокаций, деформирование материала, образование сетки микротрещин и других дефектов [2].

Учитывая, что кинетика перемещения газовой смеси от горячих поверхностей стружки и лезвия инструмента в реакционную щель является контролирующей ее дальнейшие активационные процессы, представляется важной информация о микро- и макроскопических особенностях элементарных процессов транспорта водорода в щелевое пространство. В связи с этим рассмотрим ситуацию, которая складывается ниже линии среза, т.е. ниже границы между сильно деформируемым материалом (стружка) и остальной массой металла обрабатываемой заготовки.

При вдавливании с большой скоростью участка передней поверхности резца в локализованную область обрабатываемого материала в приповерхностном слое зоны контакта возникает и распространяется деформация. Известно [9], что при резании с низкой скоростью, особенно при обработке металла в отожженном состоянии, механизм с развитой зоной пластической деформации наиболее вероятен. Деформируемая область материала становится крайне неоднородной, пронизанной многочисленными зародышами трещин и микротрещин. При обработке с высокими скоростями резания становится более приемлемым механизм деформации по плоскостям сдвига. Возникновение сетки трещин в этом случае обусловлено сдвигом слоев материала относительно друг друга, являющегося результатом ряда последовательных смещений отдельных участков решетки по плоскостям



скольжения. Все эти макро- и микроскопические изменения металла в локальной деформируемой зоне при механической обработке квазихрупких металлов представляют собой пути ускоренного проникновения водородной газовой смеси в реакционную щель.

Поступающая в пространство щели водородная газовая смесь подвергается дальнейшим превращениям до образования водородной плазмы. Увеличение степени ионизации поступившего в щель газа происходит вследствие двух параллельно протекающих процессов: взаимодействия составляющих газ углеводородных соединений с каталитически активными поверхностями [2, 10] и ударной ионизацией молекул и атомов водорода с электронами, вылетающими в момент разрыва межатомного сцепления деформируемого тела [2, 11]. Таким образом, при механической обработке металла резанием в поверхностно-активной среде образование новых поверхностей фактически играет роль спускового устройства, включающего механизмы возникновения различных физико-химических процессов и явлений, взаимодействие которых с окружающей средой вызывает ее самоактивацию вплоть до образования водородной плазмы с интенсивностью  $6 \times 10^3$  импульсов в минуту и энергией электронов, вылетающих в момент разрыва межатомного сцепления  $10^2$  эВ [12]. Экспериментальный материал, полученный при изучении взаимодействия различных физико-химических процессов и явлений с окружающей средой, свидетельствует о реальности проявления в этом случае механоплазменного эффекта [1, 2].

Прежде чем рассмотреть особенности процессов транспорта водорода из плазмы в очаг разрушения металла, важно отметить, что обилие и разнообразие материала по изучению системы металл-водород однозначно свидетельствуют о том, что такое перемещение возможно только в том случае, если водород находится в протонном состоянии [13].

Как уже отмечалось, водород всегда регистрируется в стружке и в обработанной поверхности заготовки всех без исключения металлов при их резании в поверхностно-активных средах. Это означает, что такой переход водорода возможен, когда в процессе резания протоны водорода под действием электрического поля, создаваемого термоэлектродвижущей силой, действующей в системе станок – инструмент – заготовка, из плазмы перемещаются в щелевом пространстве к его вершине, а затем проходят поверхность и диффундируют в ультрамикроскопическую область металла, где оказывают влияние на процессы перестройки и разрыва связей между ионами. При этом все процессы перемещения водорода к основной цели – очагу разрушения происходят со скоростью, превышающей скорость деформирования.

Хотя водород и обладает необычайно большой подвижностью в металлах, однако его перемещение в процессе резания с огромной скоростью, превышающей несколько метров в секунду, требует специального рассмотрения.

В процессах транспортировки протона из плазмы к очагу разрушения можно выделить три основные стадии: перемещение протона в щелевом пространстве из плазмы к поверхности деформируемой зоны заготовки, проникновение под ее поверхность в вершине щели и диффузия водорода в глубину металла.

Транспортировка водорода на первой стадии (см. рисунок) происходит вследствие взаимодействия протона с отрицательным электрическим зарядом, предельно сконцентрированным в ультрамикроскопической области, где осуществляются процессы перестройки и разрыва сил межатомных связей и, как уже отмечалось, усиливается электрическим полем. Возникновение сконцентрированного заряда связано с тем, что в деформируемой зоне адекватно росту механических напряжений увеличивается и ее дефектность. Неоднородная, насыщенная различными дефектами область материала у вершины щели затрудняет движение свободных электронов. Именно поэтому захват электронов ловушками (дефектами) способствует повышению их концентрации в деформируемой зоне, что позволяет рассматривать эту область материала, обладающую сконцентрированным отрицательным электрическим зарядом.

По-видимому, в дальнейшем, при контакте протонов с поверхностью вершины щели поток протонов разделяется на две части. Одна свободно перемещается под поверхность, а затем и транскристаллически в объеме металла. Другая – захватывается структурными дефектами, ступенями скола и другими электрически активными элементами поверхности, принимающими участие в различных физико-химических процессах [14]. К наиболее важным реакциям ионов на поверхности следует отнести нейтрализацию протонов, сопровождающуюся выделением значительного количества тепловой энергии (100 ккал/моль [15]). Важно отметить, что продукты нейтрализации находятся в состоянии высокого возбуждения и способны участвовать в дальнейших реакциях, также выделяя при этом тепловую энергию. Таким образом, вследствие узкого фокусирования потока ионизированного водорода на поверхность вер-

шины щели (или трещины разрушения) удастся реализовать там высокую плотность тепловой энергии и, следовательно, параллельный ход механического и термического воздействия на силы связи между ионами металла. Совместное влияние механической и тепловой энергии на силы сцепления снижает их, нарушая структуру кристаллической решетки и, как следствие этого, вызывает потерю устойчивости химического соединения, снижение его прочности и усиление процессов деформации и разрушения.

Что касается высокой скорости диффузии протонов водорода вглубь металла, то она, по видимому, обеспечивается внешним электрическим полем, вызванным термоэлектрической движущей силой, которое создает условия для проявления известного эффекта электронного «ветра». Проявление этого явления обусловлено тем, что электроны проводимости и водород в металле фактически становятся «привязанными» друг к другу и под действием внешнего электрического поля продолжают совместное перемещение в глубину металла с большой скоростью [16, 17]. В процессе амбиполярной диффузии, из потока совместно перемещающихся электронов и водорода, некоторые электрон-ионные образования будут захватываться дефектами, т.е. ловушками, сконцентрированными в объеме материала. Большинство исследователей считает, что энергия захвата ловушек достаточно большая и составляет несколько десятых электрон-вольта, что значительно превышает силу электронного «ветра» [14]. Следовательно, в процессе перемещения водорода в объеме металла большая интенсивность силового поля, которое создается электронными оболочками атомов металла, способна удерживать некоторую часть протонов. В этой связи даже один атом  $\gamma$ -железа может связывать до 5 протонов водорода [14], а значит, способность атома железа удерживать валентный электрон слабее способности протона водорода присоединить электрон. В результате протон водорода присоединяет электрон и образует атом ( $H^+ + e^- = H$ ), а реакция проходит с выделением большой тепловой энергии. Групповой захват протонов ловушками вызывает сконцентрированное тепловыделение, которое настолько велико, что может привести к оплавлению локальных ультрамикроскопических участков деформируемого металла. Следовательно, в микрообъеме материала тепловая энергия, образующаяся в связи с контактными взаимодействиями электрически активных частиц водорода с электрически активной реальной структурой металла, увеличивает частоту тепловых колебаний атомов материала и вероятность их разрыва. Действуя совместно с механической, они усиливают процессы деформации и разрушения и снижают энергетические затраты на резание металла в различных углеводородных СОТС.

### Заключение

Суммарные энергетические затраты на процесс механической обработки металла резанием можно значительно снизить, если процесс обработки осуществлять при постоянном поливе жидкости, содержащей полимер определенного свойства и концентрации. Такой результат достигается за счет дополнительной тепловой энергии, которая образуется в зоне разрушения материала в связи с реализацией плазменного эффекта.

Макроскопическую форму конечного проявления влияния поверхностно-активной среды на процессы деформации и разрушения металла при резании необходимо связывать не с общепринятой трактовкой адсорбционного понижения прочности, а с превращением среды в зоне разрушения в радикально-активную плазму.

Дальнейшее взаимодействие входящих в состав плазмы частиц водорода положительного заряда с электрически активной реальной структурой металла, образующейся вследствие механического воздействия, также влияет на процессы деформации и разрушения металла.

### Литература

1. Сошко А. И., Сошко В. А. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла: в 2-х т. Херсон: Олди-плюс, 2008. Т. 1, 2. 618 с.
2. Сошко В. А., Сошко А. И. Механохимическая обработка металлов. Riga, LV-1039, Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2015. 98 с.
3. Кулезнев В. И., Шершнева В. А. Химия и физика полимеров. М.: Высш. шк., 1988. 311 с.
4. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 303 с.
5. Химические реакции полимеров: учеб. в 2-х т. (под ред. Е. Феттеса). М.: Мир, 1967. Т. 2. 537 с.
6. Закревский В. А. Высокомолекулярные соединения Б 13. М.: РАН, 1971. 105 с.
7. Закревский В. А., Корсуков В. Е. Высокомолекулярные соединения А 14. М.: РАН, 1972. № 4. 955 с.

8. Кирюхин Д. П., Занин А. М., Барелко В. В., Гольданский В. И. Инициирование и самоускорение низкотемпературных химических реакций при механическом разрушении облученных твердых образцов. Докл. АН СССР. 1981. Т. 260. № 6. С. 1397–1402.
9. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высш. шк., 1974. 590 с.
10. Рогинский С. З. Основы теории катализатора. Проблемы кинетики и катализа. VI. Гетерогенный катализ. Тр. Всесоюз. конф. по катализу. М.; Л., 1949. С. 344–347.
11. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Наука, 1963. 472 с.
12. Браун Д. М., Дейнтон Ф. С. Химия электрона в конденсированных средах: Химическая кинетика и цепные реакции. М.: Наука, 1966. 482 с.
13. Галактионова Н. А. Водород в металлах. М.: Metallurgia, 1967. 303 с.
14. Алефельд Г., Фелькля И. Водород в металлах. М.: Мир, 1981. 475 с.
15. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
16. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат, 1963. 577 с.
17. Кристи Р., Питти А. Строение вещества: введение в современную физику: учеб. пособие. (пер. с англ. под ред. Ю. М. Широкова). М.: Наука, 1969. 595 с.

Поступила в редакцию 27.03.2019

### Про вплив мастильно-охолоджувальних технологічних засобів на розрив металу в процесі різання

**О. І. Сошко, В. О. Сошко, І. П. Сімінченко**

Херсонський національний технічний університет,  
73008, Україна, м. Херсон, Бериславське шосе, 24

*Показано вплив мастильно-охолоджувальних технологічних засобів на руйнування металу в процесі різання. Встановлено, що найбільш ефективними присадками до мастильно-охолоджувальних технологічних засобів (МОТЗ) є аліфатичні граничні полімери – поліетилен і полівінілхлорид. В рамках уявлень про хімічну активацію середовищ, а також проблем, що накопичилися з експериментальних матеріалів власних досліджень, проведені дослідження з якісного опису ускладнених моделей, пов'язаних з реальною мікроструктурою матеріалу і кількісними вимірами метал-водневих систем. Розглянуто різні аспекти проблем впливу механічної енергії та водню на перебудову кристалічної решітки і розриви сил міжатомних зв'язків, що виникають в ультрамікроскопічних областях. Висвітлено питання кінетики входу протона в глибину металу в системі метал–водень і його взаємодію з металом безпосередньо в області перебудови і розриву сил зв'язків між атомами на кінцевий прояв впливу середовища на процес різання. У статті описані процеси і явища, які проходять нижче кордону між сильно деформівним металом (стружкою) і решіткою маси металу оброблюваної заготовки та особливості процесів транспорту водню з плазми в осередок руйнування металу. Встановлено, що в мікрообсязі матеріалу теплова енергія, що утворюється через контактні взаємодії електрично активних частинок водню з електрично активною реальною структурою металу, збільшує частоту теплових коливань атомів матеріалу і ймовірність їхнього розриву. Діючи спільно з механічною енергією, вони полегшують процеси деформації та руйнування і знижують енергетичні витрати на різання металу в різних вуглеводневих МОТЗ. Відзначено, що присутність водню в стружці і в оброблювальній поверхні було зареєстровано під час різання металу в будь-якому водневмісному середовищі, навіть у воді. Однак концентрація водню в металі, під час його обробки в середовищі з добавкою полімеру, приблизно на два порядки вище, ніж в низькомолекулярному. Саме цей факт зумовлює значну перевагу МОТЗ з полімерними добавками.*

**Ключові слова:** водень, метал, обробка, атом, протон, мастильно-охолоджувальні технологічні засоби (МОТЗ).