Ким В. А., Мокрицкий Б. Я., Самар Е. В., Якубов Ч. Ф.
V. A. Kim, B. Ya. Mokritskii, E. V. Samar, Ch. F. Yakubov

АДГЕЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

ADHESIVE PROCESSES OF CONTACT INTERACTION WHEN CUTTING MATERIALS

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Самар Елизавета Владимировна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mrs. Elizaveta V. Samar – a post-graduate student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Якубов Чингиз Февзиевич – кандидат технических наук, доцент, ректор Крымского индустриально-педагогического университета (Россия, Симферополь).

Mr. Chingiz F. Yakubov – PhD of Engineering, Rector of the Crimean Industrial and Teaching University (Russia, Simferopol).

Аннотация. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании металлов определяют изнашивание и стойкость режущего инструмента. Пластическая деформация рабочих поверхностей режущего инструмента при резании сопровождается упрочнением и развитием центров адгезионной активности, представляющих микро- и мезомасштабные зоны с высокой плотностью дефектов кристаллического строения. Адгезионную активность таких центров можно снизить адсорбцией компонентов смазочно-охлаждающей жидкости и образованием островковых наростов из продуктов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов. Островковые наросты представляют собой особый вид вторичных структур на поверхности режущего инструмента, формирование которых идет по синергетическому алгоритму.

Summary. Adhesive processes of contact interaction when cutting metals define wear and firmness of the cutting tool. Plastic deformation of working surfaces of the cutting tool when cutting is followed by center development of adhesive activity representing micro and mesolarge-scale zones with a high density of defects in a crystal structure. Adhesive activity of such centers can be reduced by adsorption of components of lubricant cooling liquid and formation of insular outgrowths from products of dispersion of the processed and tool materials. Insular outgrowths represent a special type of secondary structures on a surface of the cutting tool which formation goes according to the synergetic algorithm.

Ключевые слова: адгезия, дефекты кристаллического строения, поверхностная энергия, диффузия, наросты, изнашивание, твердость, стойкость инструмента.

Key words: adhesion, defects of a crystal structure, superficial energy, diffusion, outgrowths, wear, hardness, firmness of the tool.

УДК 621.9.026

Введение

Доминирующая роль в изнашивании режущего инструмента отводится адгезионным процессам, так как напряжения на фактических участках контактного взаимодействия могут превышать предел прочности обрабатываемого и предел текучести инструментального материалов, и все это происходит на фоне высоких температур и скоростей деформаций. Под адгезией понимают совокупность механизмов образования связей между поверхностными слоями разнородных твердых тел, приведенных в соприкосновение. С физической точки зрения адгезия определяется силами межмолекулярного взаимодействия, ионной, ковалентной, металлической и другими типами связей. Адгезия как явление термодинамически обоснована наличием избыточной энергии в поверхностных слоях и стремлением к самопроизвольной ее минимизации. Образование адгезионных связей при контакте двух твердых тел приводит к снижению суммарной поверхностной энергии, уменьшению энергии Гиббса и повышению энтропии системы контактного взаимодействия.

Адгезия является термически активируемым явлением и источником выделения тепла в результате пластической деформации контактных слоев и диссипации внутренней энергии. Образованию адгезионных связей всегда сопутствуют структурные превращения в очагах схватывания. Высокие температуры и их градиенты, скорости нагрева и охлаждения, сопутствующие адгезии, приводят к развитию закалочных структур.

Первичные очаги адгезионного схватывания образуются в зонах с высокой внутренней энергией, которые локализуются в местах скопления поверхностных дефектов кристаллического строения разных масштабных уровней. Адгезия твердых тел начинается с образования на контактирующих поверхностях микролокальных зон с разной электронной плотностью, между которыми возникают обменные электронные процессы и кулоновские силы, определяющие прочность первичных адгезионных связей. Поля упругих напряжений являются первопричиной наведения и разделения локальных электростатических зарядов, поэтому поверхностные дефекты кристаллического строения рассматриваются как потенциальные очаги образования адгезионных связей. Возникающие первичные связи становятся активными каналами массопереноса, и это способствует образованию химических и других соединений, приводящих в конечном итоге к повышению сил адгезии [1].

Динамика развития очагов адгезионного взаимодействия объясняет многие явления, сопутствующие резанию металлов. Снижение активности адгезионных центров происходит за счет взаимодействия поверхностных дефектов кристаллического строения с продуктами разложения СОТС, в состав которых входят поверхностно-активные вещества, антифрикционные присадки и различные соли, повышающие теплофизические свойства масляной или водной основы. При осаждении продуктов разложения СОТС на участках с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения формируются более прочные адсорбционно-адгезионные слои. В результате поверхностная энергия вокруг дефекта кристаллического строения уменьшается и понижается ее активность как адгезионного центра. Образование устойчивого адсорбционно-адгезионного слоя переводит сухое трение ювенильных поверхностей в режим граничного трения.

В статье приведены результаты исследования образования и развития активности центров адгезионной активности на рабочих поверхностях режущего клина и их влияние на процессы, сопутствующие резанию металлов.

Механизмы снижения активности адгезионных центров

Рассмотрим основные феноменологические соотношения адгезионного процесса. Адгезия твердых тел характеризуется энергией и силой взаимодействия.

Суммарная поверхностная энергия при контакте твердых тел представляется в виде

$$E_{\text{пов}} = \sigma_1(\infty) + \sigma_2(\infty) - \sigma_{12}(h),$$

где $E_{\text{пов}}$ – суммарная поверхностная энергия; $\sigma_1(\infty)$ и $\sigma_2(\infty)$ – поверхностные энергии уединенных твердых тел, когда они располагаются на бесконечном расстоянии друг от друга; $\sigma_{12}(h)$ – межфазная энергия взаимодействия двух поверхностей твердых тел, находящихся на расстоянии h друг от друга.

Энергия адгезии определяется как избыток поверхностной энергии при бесконечном удалении твердых тел друг от друга, или

$$E_a = -\sigma_{12}(h).$$

Сила адгезионного взаимодействия различных материалов равна

$$F_a = -\frac{dE_a}{dh} = \frac{d\sigma_{12}(h)}{dh}.$$

Отрицательный знак означает, что сила адгезионного взаимодействия приводит к снижению избыточной поверхностной энергии. То есть чем выше сила адгезии между соприкасающимися твердыми телами, тем больше энергии затрачивается на ее формирование и меньше величина остаточной энергии адгезии. Из этого также следует, что чем прочнее адгезионная связь между покрытием и подложкой, тем ниже адгезионная активность такого образования.

При образовании на поверхности дислокаций и других дефектов кристаллического строения за счет внешнего энергетического воздействия повышается реальная площадь поверхности, а это в свою очередь приводит к росту избыточной поверхностной энергии. Наведение поверхностных дефектов кристаллического строения понижает энтропию твердого тела и повышает адгезионную активность поверхности. Энергия адгезии будет складываться

$$E_a = -\sigma_{12}(h) - E_p,$$

где E_p – энергия взаимодействия контактирующих твердых тел, имеющих поверхностные дефекты кристаллического строения.

Тогда сила адгезионного взаимодействия с учетом поверхностных дефектов кристаллического строения определится

$$F_a = \frac{d\sigma_{12}(h)}{dh} + \frac{dE_p}{dh}.$$

С повышением плотности поверхностных дефектов кристаллического строения твердых тел сила их адгезионного взаимодействия возрастает. Из этого также следует, что деформационно-упрочненная поверхностная структура обладает более высокой адгезионной активностью [2; 3]. Эта закономерность широко используется при нанесении различных покрытий путем предварительной поверхностно-пластической деформации. Сформированная таким образом поверхностная структура с высокой плотностью дислокаций обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с основой, наносимого ионно-вакуумным напылением [2].

Структурная организация адгезионного центра представляет собой совокупность поверхностных дефектов кристаллического строения, объединенных в кластер микро- или мезомасштабного уровня. В поликристаллических материалах адгезионными центрами могут быть скопления дислокаций, узлы пересечений границ зерен и т.п. Границы зерен представляют собой двумерные дефекты кристаллического строения, состоящие из дислокаций и аморфной фазы, обладающие высокой внутренней энергией. На локальных участках зеренных границ с высокой кривизной внутренняя энергия принимает наибольшие значения. К таким участкам относят пересечения границ и области стыковок нескольких зерен [4; 5].

Ювенильная поверхность твердого тела, по сути, представляет собой макромасштабный дефект кристаллического строения. Она характеризуется повышенной величиной поверхностной энергии и высокой плотностью дефектов кристаллического строения. Такая поверхность обладает высокой адгезионной активностью и при контакте с внешней средой мгновенно покрывается адсорбционным слоем. Микрошероховатость и выходы дислокаций на поверхность образуют макромасштабные зоны высокой кривизны с повышенной поверхностной энергией и адгезионной активностью. Наличие таких микрозон обеспечивает высокую поверхностную диффузию. Поверхностная диффузия отличается более высоким коэффициентом диффузии по сравнению с объемной, которая возрастает с повышением температуры [7]. Область проявления поверхностной диф-

фузии распространяется на зоны упругого дискретного и сплошного пластического контакта при резании металлов.

Диффузаны, взаимодействуя с поверхностными дефектами кристаллического строения, приводят к снижению их внутренней энергии на величину энергии связи инородных атомов и вакансий с дефектами. Уменьшение внутренней энергии поверхностных дефектов кристаллического строения приводит к понижению общего уровня поверхностной энергии, и это является главным фактором падения адгезионной активности поверхности твердого тела.

В результате наведения поверхностных дефектов кристаллического строения и осаждения на них инородных атомов, вакансий и других ноль-мерных дефектов энергия адгезии может быть выражена следующей зависимостью:

$$E_a = -\sigma_{12}(h) - E_p + E_b,$$

где E_b – энергия взаимодействия поверхностных дефектов кристаллического строения с инородными атомами, вакансиями и другими ноль-мерными дефектами.

Наросты как фактор снижения активности адгезионных центров

Высокая энергия адгезионных центров на рабочих поверхностях режущего клина способствует образованию островковых наростов из фрагментированных продуктов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов. Слои, состоящие из таких наростов, можно рассматривать как особый вид вторичных поверхностных образований, имеющих наноструктурную организацию, которые резко снижают активность адгезионных центров, повышают прочность и износостойкость рабочих поверхностей инструмента. Образование и развитие таких структур реализуются по синергетическому алгоритму.

В отличие от традиционного нароста, который образуется у вершины режущего лезвия, островковые наросты представляют собой отдельный вид адгезионных структурных образований, распределенных по всей рабочей поверхности режущего клина. Количество островковых наростов, отнесенное к единичной площади поверхности, назовем плотностью островковых наростов. Плотность островковых наростов пропорциональна характеру распределения нормальных напряжений, так как сжимающие усилия оказывают наиболее сильное влияние на активность образования адгезионных связей между инструментальным и обрабатываемым материалами.

По мере роста островковых наростов они могут сливаться, образуя крупный сплошной нарост. Вероятность появления таких наростов наиболее высока у режущей кромки, где наблюдается традиционный нарост треугольного профиля. Традиционный нарост образуется в определенном диапазоне скоростей резания, принимая определенные размеры и форму в соответствии с их химическим составом и деформационными свойствами обрабатываемого материала. Традиционный нарост может периодически отрываться, но его островковая основа сохраняется.

Сплошность островковых наростов принимает различные значения на отдельных участках контакта режущего клина с обрабатываемым материалом. На рис. 1 приведены фотографии рабочих поверхностей режущего клина на передней поверхности резца из ВК8 после точения стали 20 всухую. По представленным фотографиям видно, что с удалением от режущего лезвия сплошность островковых наростов снижается, а сами наросты уменьшаются по площади.

Строение крупных наростов, зафиксированных в зоне сплошного пластического контакта, несет следы вязкопластического течения, характерного для высокотемпературного процесса трения. Сами наросты имеют слоистое строение, которое формируется путем намазывания микрофрагментов срезаемого слоя, вырванного из сходящей стружки (см. рис. 2).

Из представленных фотографий видно, что в состав наростов и налипов входят продукты диспергирования твердого сплава. Светлые участки указывают на наличие зон со статическим электричеством, характерным для диэлектрических и полупроводниковых оксидных соединений. Наросты формируются в результате интенсивных высокотемпературных пластических деформаций нано- и микромасштабных фрагментов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов, в которых отсутствует зеренная структурная организация [10]. Интенсивная пластическая деформация фрагментированных элементов, из которых формируется нарост, не вызывает генерацию дислокаций и других линейных дефектов кристаллического строения из-за отсут-

ствия в их структуре кристаллитов, и, как следствие этого, не приводит к развитию потенциальных очагов адгезионной активности. Это обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую износостойкость наростов в контактном взаимодействии при резании металлов.

Рис. 1. Морфология передней поверхности резца из BK8 после точения стали 20:
а – вблизи режущего лезвия; б – середина зоны пластического контакта;
в – середина зоны упругого контакта; г – конечная зона упругого контакта

В зоне дискретного контакта проникновение продуктов разложения СОТС реализуется в основном за счет капиллярных процессов и поверхностной диффузии. Образующиеся разрывы между стружкой и передней поверхностью режущего клина представляют собой пустоты, внутри которых создается давление значительно ниже атмосферного, и это вызывает засасывающий эффект, облегчающий процесс проникновения компонентов внешней среды и СОТС. Характер распределения наростов и налипов зависит от активного участия внешней среды и СОТС в трибологических процессах в зоне дискретного контакта.

В зоне пластического контакта понятие сплошности носит относительный характер. Строе-ние сплошного контакта состоит из устойчивой основы, покрывающей переднюю поверхность режущего клина сплошным слоем. Форма и размеры нароста оптимизируют геометрию режущего клина и минимизируют энергетические затраты на процесс стружкообразования [10]. Сходящая стружка скользит по верхнему слою наростов, при этом условия фрикционного взаимодействия близки к режимам внутреннего трения.

Высокая температура и ее градиент активизируют диффузионные процессы между наростом и инструментальным материалом. Взаимная диффузия элементов инструментального и обрабатываемого материалов через основание нароста повышает силу сцепления, но при этом в инструменте формируется подповерхностный слой, обедненный легирующими элементами. При эксплуатации твердосплавного режущего инструмента диффузии в большей степени подвержена кобальтовая связка, приводящая к ослаблению связи между карбидными зёрнами. Разрыв отдель-

ных адгезионных связей происходит по этому слою, и оторвавшийся нарост уносит с собой некоторую часть инструментального материала или частицы износа.

Рис. 2. Слоистое строение нароста на передней поверхности резца из P6M5K5 при точении титанового сплава BT22

На рис. 3 показаны оторвавшиеся наросты, прилипшие к внутренней поверхности стружки с частицами инструментального материала (см. рис. 3, а) и без них (см. рис. 3, б). Так происходит изнашивание режущего инструмента в зоне пластического контакта. Оторвавшиеся наросты некоторое время находятся в зоне контакта, совершают ротационные движения и нарушают сплошность самого пластического контакта.

Нарушение пластического контакта сопровождается образованием микролокальных разрывов и пустот, создающих засасывающий эффект компонентов внешней среды и СОТС. Обновленная поверхность инструмента, образовавшаяся в результате отрыва нароста, является активным каналом поверхностной диффузии, функционирующим до формирования нового нароста.

Рис. 3. Оторвавшиеся наросты на внутренней поверхности стружки:
а – нарост с частицами износа инструмента; б – без частиц износа инструмента

Повышенными каналами диффузионной проводимости являются внутренние границы раздела зерен и фаз, активность которых зависит от их геометрии и структуры. Поверхностная диффузия на 1...2 порядка выше объемной, граничная диффузия на 1...2 порядка выше объемной и остается такой же активной на поверхности. Диффузия вдоль границ зерен, образующая тройные

стыки, на 2...3 порядка выше по сравнению с чисто граничной диффузией [7]. Приведенные значения показывают, что в поверхностных слоях в зоне пластического контакта присутствует множество структур, обеспечивающих атомарный массоперенос, который в пределе на 6...8 порядков превышает активность объемной диффузии.

Пластическая деформация контактных слоев инструмента при резании металлов охватывает микро- и мезомасштабный уровни. На микроуровне происходит генерация дислокаций, а на мезоуровне – фрагментация и развитие ротационно-трансляционных вихрей. Синергетический алгоритм пластической деформации проявляется в нарушении любой микромасштабной упорядоченности и воспроизводстве упорядоченности на мезомасштабном уровне [11]. Этим можно объяснить, почему в контактных слоях режущего инструмента редко фиксируются с помощью электронных микроскопов дислокационные структуры, но легко выявляются уширения интерференционных линий при рентгеноструктурном анализе, а также мезоструктурная упорядоченность [12-14].

Генерация линейных дефектов и фрагментация мезоструктур являются разными стадиями развития единого деформационного алгоритма. Образование нароста за счет активных адгезионных процессов происходит на стадии генерации дефектов кристаллического строения, при этом сформировавшийся нарост тормозит переход деформационного процесса на мезомасштабный уровень.

Прочность адгезионной связи и вероятность отрыва частицы износа при ее разрушении зависят от энергетического состояния и степени перекрытия совмещаемых зон бифуркации обрабатываемого и инструментального материалов. На рис. 4 приведена условная диаграмма распределения центров бифуркации на деформационно-энергетических шкалах инструментального материала (ИМ) и стружки (С). Деформационно-энергетическая шкала представляет собой совокупность значений энергий активации образования различных дефектов кристаллического строения и генерируемых ими типов носителей деформации. Каждый центр бифуркации представляет собой микролокальную зону, состоящую из дефектов кристаллического строения и поля упругих напряжений вокруг них. Энергия активации центра бифуркации зависит от структурной организации дефектов кристаллического строения, которые определяют тип носителя пластической деформации или строение первичного очага разрушения при реализации бифуркационного алгоритма.

Между точками бифуркации располагаются энергетические зоны определенного типа носителя пластической деформации. В общем случае до первой точки бифуркации лежит область двойников, между первой и второй – зона дислокаций, между второй и третьей – зона дисклинаций, между третьей и четвертой – зернограничное скольжение, а за четвертой точкой – зона ротационно-трансляционных вихрей.

На деформационной шкале внутренней поверхности стружки отсутствует первая точка бифуркации, где происходит смена двойников на дислокации. Это связано с тем, что обрабатываемый материал, вступающий в контактный процесс с инструментом, находится в таком напряженно-деформированном состоянии, при котором его дальнейшая деформация протекает вдали от нелинейной упругости.

Рис. 4. Условная диаграмма энергетического распределения бифуркационных зон

На деформационной шкале инструментального материала отсутствует зона ротационно-трансляционных вихрей. Высокая термическая устойчивость (красностойкость), износостойкость и прочность инструментального материала не позволяют структуре подвергаться при локальной пластической деформации фрагментации, т.е. отсутствует способность к образованию активных фрагментированных мезоструктур. Поэтому наиболее энергоемким носителем пластической деформации в инструментальных сталях становится зернограничный сдвиг, а четвертая точка бифуркации функционирует только в режиме разрушения, при этом ее положение на деформационной шкале носит нефиксированный характер. Это означает, что любое мезомасштабное смещение в инструментальном материале может привести к образованию несплошности или очага разрушения.

В металлокерамических твердых сплавах проблематичным является зернограничное скольжение. Каждое зерно представляет собой частицы карбида или нитрида тугоплавкого металла, связанные между собой относительно тонким и пластичным металлическим слоем. В такой структуре для образования мезоструктурного кластера со своей внутренней структурной организацией недостаточно существующих сил межзеренного взаимодействия, поэтому деформационные процессы реализуются за счет автономного развития дислокаций в карбидном зерне и кооперативного смещения группы карбидных частиц, слабо зависимых друг от друга. Активные адгезионные центры в этом случае могут развиваться только в местах скопления дислокаций в карбидном зерне. Следовательно, на деформационно-энергетической шкале металлокерамического инструментального материала присутствует только одна точка бифуркации, связанная с дислокациями в карбидной фазе.

Если принять, что функционирование диссипативного процесса в зонах концентратора напряжения носит термоактивационную природу, а их энергетическая активность подчиняется распределению Гиббса, то вероятность появления адгезионного процесса можно выразить [12] уравнением

$$p_j = \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right),$$

где E_j – энергия активации образования элементарной адгезионной связи; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Величина единичного теплового импульса при этом составит

$$q_i = E_j \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right).$$

Вероятность совмещения бифуркационных зон стружки и режущего инструмента определяется

$$p_a = \exp\left(-\frac{E_{имi}}{RT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{cj}}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{E_{имi} + E_{cj}}{RT}\right).$$

Это же соотношение характеризует вероятность образования адгезионных связей. Минимальная суммарная величина энергий активации будет определять наименьшее значение возможного теплового импульса, а максимальная – наибольшую. Общее количество тепла, выделяющегося при образовании адгезионных связей на передней рабочей поверхности режущего клина, будет равно

$$Q_{пер} = \sum_F (E_{имi} + E_{ci}) \cdot \exp\left(-\frac{E_{имi} + E_{ci}}{RT}\right).$$

Более прочные адгезионные связи наводятся при совмещении наиболее энергоемких точек диссипации и бифуркации, но вероятность такого сочетания является наименьшей. Следовательно, не все адгезионные связи при разрыве производят частицы износа. Наиболее вероятно образование прочных адгезионных связей и образование частиц износа в зонах распространения концен-

тратора напряжений, генерирующих зернограничное скольжение на поверхности инструментального материала.

Если исходить из того, что распределение бифуркационных зон подчиняется законам статистической термодинамики и, в частности закону Больцмана, т.е. количество бифуркационных центров будет тем больше, чем меньше их энергия, тогда среднее значение энергии адгезионного центра можно определить [15]

$$E_{cp} = \frac{E_{nm}}{\exp\left(\frac{E_{nm}}{RT}\right) - 1}.$$

Величина $\exp\left(-\frac{E_{nm}}{RT}\right) < 1$, так как определяет вероятность образования адгезионного центра, общее число которых достигает больших величин. Это означает, что $E_{nm} \gg RT$. Тогда среднее значение энергии адгезионного центра можно определить

$$E_{cp} = E_{nm} \cdot \exp\left(-\frac{E_{nm}}{RT}\right).$$

При наличии СОТС и процесса наростообразования активность адгезионных центров снижается, тогда

$$E_{Ccp} = (E_{nm} - E_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_{nm} - E_c}{RT}\right),$$

где E_c – величина снижения энергии адгезии за счет СОТС и наростообразования.

Из полученного уравнения следует, что с применением СОТС и наростообразования вероятность появления адгезионного центра с более низкой активностью возрастает, т.е. плотность адгезионных центров, потенциально способных к отрыву инструментального материала, снижается.

Скорость массового изнашивания режущего инструмента при резании всухую в общем случае можно представить эмпирическим выражением [16]

$$\frac{dM}{dt} = i_M = \frac{Kp^a v^b}{H^c},$$

где p – нормальное давление на рабочей поверхности режущего клина; v – скорость резания; H – твердость инструментального материала; K, a, b, c – константы контактного процесса резания.

Связь между скоростью изнашивания и активностью адгезионного взаимодействия можно выразить соотношением

$$\frac{Kp^a v^b}{H^c} = \alpha E_{cp},$$

где α – коэффициент, учитывающий разрушение инструментального материала при разрыве адгезионной связи.

Тогда снижение скорости изнашивания за счет СОТС и наростообразования можно определить

$$\eta_c = \frac{i_{Mc}}{i_M} = \frac{E_{nm}}{E_{nm} - E_c} \exp\left(\frac{E_c}{RT}\right).$$

Учитывая, что поверхностные слои рабочих поверхностей режущего клина подвергаются еще и деформационному упрочнению, то общий эффект снижения скорости изнашивания при резании за счет формирования вторичных структур и снижения адгезионной активности будет равен

$$\eta_c^* = \frac{i_{Mc}}{i_{Mc}} = \left(\frac{H_y}{H} \right)^c \cdot \frac{E_{nm}}{E_{nm} - E_A - E_O - E_H} \exp \left(\frac{E_A + E_O + E_P}{RT} \right).$$

где E_A , E_O , E_H – снижение энергии адгезионного центра за счет адсорбции, образования оксидов и нароста соответственно; H_y – твердость упрочненной поверхностной структуры инструмента.

Численные величины E_A , E_O , E_H на разных участках контактной поверхности принимают свои значения, которые определяют геометрическую неоднородность износа режущего инструмента.

Заключение

Триботехнические процессы контактного взаимодействия при резании и развитие центров адгезионной активности на рабочих поверхностях режущего инструмента, представляющих мезомасштабные зоны с высокой плотностью дефектов кристаллического строения, взаимосвязаны между собой. Адгезионную активность таких центров можно понизить за счет адсорбции компонентов СОТС и продуктов их разложения, а также образования на рабочих поверхностях режущего клина островковых наростов из диспергированных фрагментов обрабатываемого и инструментального материалов. Островковые наросты представляют собой особый тип диссипативных структур с высокими антифрикционными свойствами, и их развитие реализуется по синергетическому алгоритму. Образование островковых наростов повышает стойкость режущего инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
2. Технологические методы повышения долговечности машин микрокриогенной техники / Б. Т. Грязнов, А. Н. Зинкин, В. В. Прудников, В. П. Стаценко. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 272 с.
3. Мамонова, М. В. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы / М. В. Мамонова, В. В. Прудников, И. А. Прудникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 400 с.
4. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондаль и др.; отв. ред. В. Б. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
5. Чувильдиев, Н. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и практика / Н. Н. Чувильдиев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.
6. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
7. Мерер, Х. Диффузия в твердых телах / Х. Мерер; пер. с англ. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
8. Любарский, И. М. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с.
9. Новиков, И. И. Кристаллография и дефекты кристаллического строения / И. И. Новиков, К. М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
10. Кабалдин, Ю. Г. Атомно-дислокационный подход к процессу резания металлов / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Кузьмишин, С. В. Серый // Машиностроение и автоматизация. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 189-198.
11. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
12. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
13. Ким, В. А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии и изнашивании / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1(18). – С. 79-85.
14. Ким, В. А. Морфология контактных поверхностей быстрорежущего инструмента при точении титанового сплава ВТ20 / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 56-63.
15. Кайзер, Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов / Дж. Кайзер; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 608 с.
16. Галахов, М. А. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / М. А. Галахов, П. П. Усов. – М.: Наука, 1990. – 240 с.