Ким В. А., Якубов Ф. Я., Якубов Ч. Ф.
V. A. Kim, F. Y. Yakubov, Ch. F. Yakubov

МОРФОЛОГИЯ КОНТАНТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT20

HIGH SPEED CUTTING TOOL SURFACE MORPHOLOGY WHEN TURNING BT20 TITANIUM ALLOY

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

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

Якубов Февзи Якубович – доктор технических наук, профессор, ректор Крымского индустриально-педагогического университета (Россия, Симферополь).

Mr. Fevzi Y. Yakubov - D.Sc. in Engineering, Professor, Rector of Crimean industrial and pedagogical university (Russia, Simferopol).

Якубов Чингиз Февзиевич – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Крымского индустриально-педагогического университета (Россия, Симферополь).

Mr. Chingiz F. Yakubov – PhD in Engineering, Associate Professor of the Machine Building Technology Department, Crimean industrial and pedagogical university (Russia, Simferopol).

Аннотация. Вторичные структуры, образующиеся на рабочих поверхностях режущего клина, имеют мезоструктурную организацию и функционируют в диссипативном режиме. В статье приведен анализ рельефа рабочих поверхностей режущего инструмента, полученный с помощью растрового электронного микроскопа, раскрывающий механизм образования и работы вторичных мезоструктур. Показано, что диссипативная активность вторичных структур определяется структурной организацией рабочих поверхностей режущего инструмента на мезомасштабном уровне и связана с работой внутреннего трения на границах мезообъектов.

Summary. The secondary structures formed on working surfaces of the cutting wedge have the mesostructural morphology and function in the dissipative mode. The article provides the analysis of the cutting tool working surfaces projection received by means of a scanning electronic microscope that shows the mechanism of secondary mesostructures forming and working. It is shown that the dissipative activity of secondary structures is defined by the structural morphology of the cutting tool working surfaces at the mesoscale level and is connected with internal friction within mesoobject boundaries.

Ключевые слова: рельеф поверхности, резец, точение, обрабатываемый материал, мезоструктура, диссипация, износ, разрушение, деформация, напряжения.

Kew words: surface projection, cutter, turning, the process material, mesostructure, dissipation, runout, destruction, deformation, tension.

УДК 621.941:620.22

Введение

Силовые и тепловые процессы при резании материалов вызывают интенсивную пластическую деформацию контактных поверхностей режущего инструмента, приводящую к развитию вторичных структур. Вторичные структуры отличаются по строению и свойствам от исходного инструментального материала, но именно они в значительной степени обеспе-

чивают эксплуатационные показатели инструмента, производительность и качество механической обработки [1].

В развитии вторичных структур при контактном взаимодействии основную роль играют процессы генерации различных дефектов кристаллического строения, инициированные пластической деформацией, протекающие на фоне высоких температур и их градиентов. Принципиальные закономерности структурообразования при пластической деформации раскрывает физическая мезомеханика. В основе физической мезомеханики лежит представление о многоуровневой и многомасштабной структурной организации носителей пластической деформации. С повышением энергетики деформационного воздействия активность носителей пластической деформации последовательно переходит от кристаллического масштабного уровня до нано-, затем микро-, далее мезо- и заканчивается макромасштабом, при этом основная деформационная активность приходится на мезомасштабный уровень и реализуется через мезоструктуры. Деформационная динамика мезоструктур описывается ньютоновскими уравнениями механики, математический аппарат которой достаточно исследован для многих схем обработки материалов [2].

Сопrotивляемость материала разрушению, согласно принципам синергетики, определяется не только его механической прочностью, но и способностью рассеивать энергию механического воздействия, а активность этого процесса во многом определяется организацией мезоструктурного уровня. Мезоструктуры представляют кластеры из кристаллитов и зерен с предельно высокой плотностью дефектов кристаллического строения, объединенные общей границей раздела. Мезоструктуры при пластической деформации функционируют как трансляционно-ротационные вихри и сдвиговые фрагментированные образования, при этом поток механической (деформационной) энергии трансформируется в тепло за счет работы внутреннего трения на границах мезокластера [2; 3]. Мезоструктуры являются динамическими образованиями, а их структурная организация, ответственная за диссипативные свойства, проявляется только в период действия деформационного нагружения или другого энергетического воздействия. После прекращения деформационного воздействия диссипативная структура переходит в статичное состояние, которое сильно отличается от его динамичного состояния.

Развитие мезоструктур хорошо исследовано и широко освещено в литературе для «простых» схем деформации, таких как: одноосное растяжение, сжатие и др. При сложной пластической деформации многие вопросы остаются открытыми. Условия формирования вторичных структур, образование мезообъектов и функционирование диссипативных структур в узлах трения и на рабочих поверхностях режущего инструмента имеют свои особенности, связанные с локализацией трибологических процессов только в поверхностных слоях, высокими значениями градиентов температур и напряжений, дискретностью контакт, неоднородностью распределения тепловых источников и динамикой их функционирования.

В статье представлены результаты исследований развития мезоструктур на рабочих поверхностях режущего инструмента, выявляемые по анализу рельефа и раскрывающие механизмы их образования и функционирования.

Методика исследования

Исследования проводились при точении титанового сплава BT20 цельным быстрорежущим резцом из P6M5K5 с геометрией режущего клина: передний угол $\gamma = 0$, задний угол $\alpha = 12^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Режимы точения: скорость резания $V = 25$ м/мин, подача $S = 0,07$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм.

Микроструктура исходной быстрорежущей стали P6M6K5 после стандартной закалки и отпуска определялась с помощью металлографического микроскопа Nikon. Исследуемые образцы предварительно изготавливались по традиционной методике приготовления металлографических шлифов и травились 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Состояние рельефа поверхности резца на рабочих поверхностях и примыкающих к ней зон исследовалось с помощью растрового электронного микроскопа S3400-N (Hitachi).

На рис. 1 представлена микроструктура исследуемой быстрорежущей стали Р6М5К5, состоящая из мартенсита закалки и глобулярных карбидов, равномерно распределенных по всему объему. Высокая твердость быстрорежущей стали обеспечивается повышенной концентрацией легирующих элементов и мелкими карбидами, играющими роль дисперсных частиц.

Рис. 1. Микроструктура быстрорежущей стали Р6М6К5 после стандартной закалки и отпуска

Результаты исследования и их анализ

На рис. 2 приведены фотографии передней поверхности резца из Р6М5К5 после точения титанового сплава. Согласно теории резания металлов контактную поверхность можно разделить на две зоны сплошного и дискретного контакта со стружкой. Зона сплошного контакта определяется размером нароста, который периодически срывается, обнажая поверхность и вызывая динамические возмущения процесса резания. В большинстве случаев нарост играет защитную функцию и оптимизирует геометрию режущего клина. Зона дискретного контакта характеризуется падающей эпюрой контактных напряжений, относительно высокой скоростью скольжения стружки и повышенной интенсивностью изнашивания. Из-за высоких нормальных напряжений на определенном участке дискретного контакта наблюдается режим сухого трения инструмента со стружкой. Максимальная глубина лунки износа располагается в зоне дискретного контакта [4].

Поверхность после заточки представляет периодический рельеф, состоящий из бороздок разной глубины, образованных за счет микрорезания абразивными зернами заточного круга и ориентированных вдоль скорости шлифования (см. рис. 2, а и рис. 2, б). На отдельных участках между бороздками видна сетка линий, ориентированных под углом близким к $\pi/4$ относительно скорости шлифования. Они представляют систему из плоскостей сдвигов, которые образуются при высоких касательных напряжениях выше предела текучести. Такие полозья скольжения образуются, как правило, в области сжимающих напряжений. На других участках наблюдаются полосы, перпендикулярные направлению скорости шлифования, которые возникают в результате хрупкого разрушения за счет растягивающих напряжений. Все это указывает на высокий уровень контактных напряжений, действующих на переднюю поверхность и носящих циклический характер.

Рис. 2. Рельеф различных участков передней поверхности быстрорежущего резца после точения титанового сплава BT-20: а – общий вид передней поверхности; б – рельеф передней поверхности после заточки резца; в – мезоплита, вдавленная в поверхность; г – рельеф передней поверхности в зоне износа

Неравномерное распределение глобулярных карбидов, присутствие которых выявляется преимущественно на боковых поверхностях глубоких бороздок, а также их отсутствие на вершинах неровностей, имеющих вид плато, указывает на неравномерность температурного поля в пределах микролокальных зон. Более высокая температура на вершинах вызывает интенсивное растворение карбидов и развитие структур, образующихся в результате вторичной закалки в результате воздействия мощного теплового импульса, инициированного процессом заточки. На таких участках обнаруживаются пересечения двойниковых плоскостей и колоний из глобулярных объектов, представляющих вершины дендритов первого порядка. Такие колонии хорошо видны в левом нижнем углу рис. 2, б.

Геометрия верхнего слоя передней поверхности, сформированного в результате трения со стружкой, определяется конвективными процессами массопереноса в результате функционирования ротационно-трансляционных вихрей. Рельеф таких структур хорошо виден на рис. 2, в. На поверхности также имеются микробороздки, ориентированные по направлению движения срезанного слоя.

Разные стадии износа передней поверхности показаны на рис. 2, в и рис. 2, г. В первом случае (см. рис. 2, в) рельеф поверхности несет следы сильных локальных пластических деформаций и состоит из островковых образований определенной толщины с «заторможенными» ротационно-трансляционными вихрями. Полученная поверхность представляет си-

стему мезомасштабных плит, которые являются фрагментированными элементами мезоструктуры, при этом микроструктура каждой мезоплиты имеет слоистое строение, а каждый слой состоит из заторможенных ротационных вихрей с максимальной плотностью дефектов кристаллического строения. «Застывшие» ротационные вихри по сечению представлены на рис. 3 в виде упорядоченного скопления структурных объектов круглой и эллипсоидной формы. При этом круги располагаются в нижней части вторичного слоя, а по мере приближения к внешней поверхности они трансформируются вначале в эллипсы, а затем в сигарообразные фигуры. Трансформация ротационных вихрей из окружности в эллипс является результатом более высокой степени пластической деформации за счет роста сдвиговых компонент тензора деформаций.

Рис. 3. Вторичная структура на передней поверхности быстрорежущего резца после точения титанового сплава

Микрофотография, приведенная на рис. 3, полученная на растровом электронном микроскопе, представляет шлиф, который является срезом резца вдоль направления схода стружки. Светлый оттенок вторичного слоя на передней поверхности указывает на высокую плотность электростатического электричества, которое характерно для структур с повышенным электрическим сопротивлением. Это косвенно подтверждает высокую плотность дефектов кристаллического строения вторичной структуры. Степень пластической деформации по глубине мезоплиты носит падающий градиентный характер, при этом имеется четкая граница между слоем из мезоплит и подложной. По сути, мезоплиты являются промежуточными звеньями между инструментом и скользящей стружкой, которые воспринимают поток механической энергии контактного взаимодействия, выравнивают максимальные пиковые нагрузки путем их равномерного распределения по площади мезоплиты и реализуют диссипативные процессы за счет работы внутреннего трения между слоями мезоплит [5; 6].

Итак, вторичная структура на передней поверхности режущего инструмента представляет систему мезомасштабных плит, которые под действием трибологического взаимодействия со стружкой совершают сдвиговые и ротационные смещения. Деформационное смещение мезоплит завершается их отслаиванием и дроблением, а образующиеся при этом фрагменты уносятся стружкой из зоны контактного взаимодействия. Фрагмент мезоплиты, шаржированный в поверхность, зафиксирован на рис. 2, в. Устойчивость и механическая прочность мезоплит обеспечивают износостойкость передней поверхности и стойкость режущего инструмента.

По мере разрушения мезоплит рельеф поверхности, полученный заточной, полностью заменяется на рельеф, сформированный за счет трения со стружкой (см. рис. 2, з). На отдельных участках могут присутствовать островковые образования из мезоплит, но они перестают играть роль фактора, сдерживающего поверхностное разрушение, так как возрастающая интенсивность изнашивания передней поверхности не благоприятствует формированию устойчивой и прочной микроструктуры мезоплит. Смещения и отрыв мезоплит и фрагментов их разрушения на этой стадии процесса изнашивания приводят к повышению абразивности контактного взаимодействия, активизируя процессы микромасштабного срезания подповерхностного слоя. Интенсивность изнашивания повышается, и это приводит к падению стойкости инструмента.

Рис. 4. Рельеф различных участков задней поверхности быстрорежущего резца после точения титанового сплава BT-20: а – общий вид задней поверхности; б – фрагментированные мезоструктуры вблизи режущей кромки; в – фрагментированные мезоструктуры вблизи «носика» износа; г – фрагментированные мезоструктуры на боковой поверхности «носика» износа

Образование и развитие мезоструктуры на задней поверхности режущего клина имеют свои отличительные особенности. На рис. 4 представлены различные участки задней поверхности быстрорежущего резца из P6M5K5 после точения титанового сплава BT-20. Режущая кромка на рис. 4, а представлена в виде вертикального двугранного угла с правой стороны снимка, на котором четко видны следы потери формоустойчивости за счет пластической деформации. Это указывает, что контактные напряжения значительно превосходят

истинный предел текучести инструментального материала, снижение которого вызвано высокой температурой зоны резания.

Вершина режущего клина находится в сложно-деформированном состоянии. Срезаемая стружка и перемещение инструмента относительно обработанной поверхности вызывают смещение поверхностных слоев передней и задней поверхностей от вершины режущего клина. В результате напряженно-деформированное состояние самой режущей кромки больше соответствует одноосному сжатию, при этом максимальные касательные напряжения будут располагаться в плоскостях примерно под углом 45° к передней и задней поверхностям. Суммарное направление сдвига у самой вершины режущего клина будет ориентировано по направлению биссектрисы угла заострения.

Пластическая деформация кромки приводит к фрагментации микроструктуры поверхностных слоев с активными плоскостями сдвига. Другими словами, плотность потока механической (деформационной) энергии будет рассеиваться за счет работы внутреннего трения между фрагментированными слоями, а сами фрагментированные слои чешуйчатой формы являются диссипативными структурами, функционирующими на задней поверхности инструмента. На рис. 4, б показаны фрагментированные слои чешуйчатой формы, расположенные у самой режущей кромки. На фотографии видно четкое разделение фрагментированных чешуек, смещающихся в направлении передней и задней поверхностей.

Само изнашивание на задней поверхности режущего клина связано со сдвигом фрагментированных слоев, их перемещением, отрывом, дроблением и размазыванием на обработанную поверхность. Следы размазывания продуктов изнашивания зеркально отражаются на поверхности фаски износа по задней поверхности (см. рис. 4, а). Динамика смещения фрагментированных слоев носит циклический характер, так как функционирование реальных очагов адгезионного схватывания дискретно во времени и вероятно по местоположению. На рис. 4, в и 4, г показаны границы фаски износа с задней поверхностью резца, где выявляется слоистое строение структуры, сформированной в результате трения инструмента с обработанной поверхностью, а также следы их напоя слоев друг на друга и размазывания.

Работу внутреннего трения при скольжении мезоструктур относительно друг друга, равную диссипативному потоку, можно в первом приближении оценить

$$A_{BT} = \Delta^{D_f} \tau_m v N,$$

где Δ – средний диаметральный размер мезоструктурного элемента; D_f – фрактальная размерность границ; τ_m – предел текучести; v – скорость относительного скольжения на границах мезоструктур; N – объемная плотность мезоструктурных элементов, участвующих в диссипативном процессе.

Мезоструктурная организация материалов носит фрактальный характер [3]. Следовательно, между средним размером мезоструктуры и их объемной плотностью имеет место скейлинговая зависимость

$$N = \frac{C}{\Delta^{D_n}},$$

где D_n – фрактальная размерность распределения мезоструктур; C – const.

Если предположить, что частица износа образуется из мезоструктурного объекта, то работу разрушения можно представить

$$A_{изн} = \Delta^{D_f} \sigma_a \omega_T N_{изн},$$

где σ_a – предел прочности на разрыв; ω_T – частота флуктуационного разрыва атомарной связи; a – параметр кристаллической решетки; $N_{изн}$ – количество мезоструктурных объектов, из которых формируются частицы износа.

Суммарный диссипативный поток складывается из работы внутреннего трения и работы разрушения мезообъектов. В результате получим

$$A_{\text{дис}} = \frac{C}{\Delta^{D_n - D_f}} (\tau_m \nu + \sigma_s a \omega_m \alpha),$$

где α – относительная доля мезоструктурных объектов, из которых образуются частицы износа.

Основными мезоструктурными параметрами, определяющими активность диссипативного потока, являются средний размер мезоструктурного объекта, его фрактальная размерность границ и фрактальная организация самой мезоструктуры. С повышением степени пластической деформации фрагментированные элементы уменьшаются в размере, дробление фрагментированных элементов также приводит к их измельчению ($\Delta \rightarrow \min$), подвижность границ возрастает, что приводит к снижению фрактальной размерности границ ($D_f \rightarrow 1$), а структурная организация мезообъектов усложняется ($D_n \rightarrow 3$). В результате диссипативные свойства вторичных структур, имеющих мезоструктурную организацию, возрастают, и это приводит к повышению плотности мощности диссипативного потока [7].

Численные значения параметров, входящих в указанные формулы, можно определить по фотографиям рельефа поверхностей износа.

Заключение

Вторичные структуры, образующиеся на рабочих поверхностях режущего инструмента в процессе резания, должны в первую очередь выполнять функцию диссипативных структур. Физической мезомеханикой показано, что основные диссипативные процессы при пластической деформации и контактном взаимодействии реализуются на мезоструктурном уровне за счет работы трения на внутренних границах раздела. Развитие мезоструктур на передней и задней поверхностях режущего клина при резании подчиняется общим закономерностям физической мезомеханики и связано с мезомасштабной фрагментацией.

Основную диссипативную функцию на передней поверхности режущего клина выполняют мезомасштабные образования в виде плит и валиков, состоящие из заторможенных ротационных вихрей, а сам процесс диссипации заключается в скольжении на границах мезоструктур.

На задней поверхности режущего клина вторичная структура состоит из чешуйчатых фрагментов, образованных в результате сдвигов и размазывания поверхностных слоев за счет сил трения инструмента с обработанной поверхностью, а диссипация определяется работой трения при смещении фрагментированных элементов относительно друг друга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
2. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Т. 1 / под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Наука, СИБ РАН, 1995. – Т. 1. – 298 с.
3. Иванова, В. С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
4. Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
5. Ким, В. А. Роль износостойких покрытий в контактных процессах трения и изнашивания / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV- 1(4). – С. 54-60.
6. Ким, В. А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии и изнашивании / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1(18). – С. 79-85.
7. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симферополь: Крымское отделение УЧПЕДГИЗ, 2005. – 300 с.