УДК 621.9.026

СТРУКТУРНО-КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Отряскина Т.А., Ким В.А., Сарилов М.Ю.

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, e-mail: knastu2000@mail.ru

В результате высокоскоростной пластической деформации, сопровождающей процесс обработки металлов резанием, согласно физической мезомеханике происходит разбивка микроструктуры и образование фрагментированных элементов (кластеров) на мезомасштабном уровне, границы которых несут полную информацию о состоянии и предыстории его развития, они выполняют функцию своеобразного интерфейса. Фрактальная размерность и плотность границ являются количественными показателями степени развитости границ, но отражают разные стороны этого свойства. Предложенная методика количественного структурного анализа позволяет проследить характер изменения деформационных процессов в зоне стружкообразования. Параметр бинарного множества структуры, включающий в себя фрактальную размерность и плотность границ раздела, позволяет оценить микро- и мезоструктуры стружки и раскрывает динамику деформационного процесса и смену носителя пластической деформации при переходе от микро- к мезомасштабному уровню. Количественный структурный анализ стружкообразования показывает, что пластическая деформация до зоны сдвига сопровождается измельчением зерна и повышением степени развитости межзеренных границ, а диссипация осуществляется за счет дислокационной динамики и зернограничного скольжения. В области сдвига образуются фрагментированные элементы стружки, плотность которых повышается по мере повышения степени пластической деформации. Низкая степень развитости границ раздела кластеров указывает на их высокую подвижность и диссипативную активность.

Ключевые слова: стружкообразование, пластическая деформация, мезоструктура, фрактальная размерность

STRUCTURAL QUANTITATIVE PARITIES OF PROCESS CUT-FORMATION

Otryaskina T.A., Kim V.A., Sarilov M.Y.

Komsomolsk-on-Amur state technical university, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: knastu2000@mail.ru

As a result, high-speed plastic deformation accompanying the metal cutting process, according to the physical breakdown occurs mesomechanics microstructure formation and fragmented elements (clusters) on the mesoscale level, the boundaries of which carry complete information on the status and history of its development, they function as a kind of interface. Fractal dimension and density boundaries are quantitative indicators of the degree of development boundaries, but reflect the different sides of this property. The proposed method for the quantitative structural analysis allows us to trace the variation of deformation processes in the area of chip. Parameter sets of binary structure, comprising the fractal dimension and density interfaces to evaluate micro and mesostructure chips and reveals the dynamics of the deformation process and changing the media of plastic deformation in the transition from the micro to the mesoscale level. Quantitative structural analysis of chip shows that the plastic deformation to the shear zone is accompanied by grain refinement and an increase in the degree of development of grain boundaries and dissipation at the expense of dislocation dynamics and grain boundary sliding. In the shear elements are formed of fragmented chip whose density increases with increasing degree of plastic deformation. Low level of development of interfaces clusters indicates their high mobility and dissipative activity.

Keywords: Cut-formation, plastic deformation, mesostructure, fractal dimension

Стружкообразование при резании металлов представляет собой высокоскоростную пластическую деформацию, приводящую к разрушению срезаемого слоя, и подчиняется общим законам механики деформируемого твердого тела. Современный подход к пластической деформации твердых тел базируется на физической мезомеханике, концептуальным положением которой является множественность носителей пластической деформации и многомасштабная самоорганизация деформируемой структуры [1–3]. Носителем пластической деформации на микромасштабном уровне является поток линейных дефектов кристаллического строения – дислокаций. При достижении плотности дислокаций критической величины происходит смена носителя пластической деформации на зернограничное скольжение, приводящее к формированию кластеров, объединяющих в себе несколько зерен со слабо подвижными внутренними границами. Дальнейшая пластическая деформация переносится на границу между кластерами и связывается с динамикой кластеров и образованием фрагментированных структур мезомасштабного уровня [1, 7].

В материале всегда присутствуют такие структурные компоненты, которые несут полную информацию о состоянии и предыстории его развития, они выполняют функцию своеобразного интерфейса. В гетерогенных материалах такую роль играют границы зерен и границы раздела фаз [2]. Степень развитости границ несет информацию о деформационных и термических процессах, вызывающих в материале структурные изменения. Они в свою очередь отражаются на величине химического потенциала, той ее составляющей, которая

связана с работой образования поверхностей раздела.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились при свободном поперечном точении диска шириной 3,5 мм из стали 3 резцом, оснащенным керамической пластинкой ВОК 60 на режимах резания: скорость $V = 800$ м/мин и толщине срезаемого слоя $S = 0{,}115$ мм/об. Выбор керамической пластинки ВОК 60 и режимов резания обосновывался низким коэффициентом трения при таком сочетании инструментального и обрабатываемого материалов и отсутствием нароста.

Корни стружек получали с помощью специальной установки – откидной резец. Корень стружки отрезался от заготовки вместе с примыкающим к нему обрабатываемым материалом, заливался в цилиндрической стальной капсуле сплавом Вуда и подвергался металлографическому исследованию.

Микроструктура определялась на микроскопе «Микро-200» при 1000-кратном увеличении. Фиксировалась область исходного материала, зона начала сдвигового процесса, верхняя зона сдвигового процесса и сформированная стружка. Полученные цифровые фотографии микроструктур обрабатывались с помощью специальной программы Image.Pro. Plus.5.1. Процедура обработки микроструктур включала корректировку контраста, выделение границ зерен и границ раздела фрагментированных элементов, измерение площади (F_i) и периметра (P_i) каждого микроструктурного образования и фрактальную размерность границ (D). На одной фотографии микроструктуры фиксировалось более 200 объектов микроструктуры. По полученным результатам вычислялась плотность границ $p_i = P_i/F_i$.

Каждый микро- и мезоструктурный элемент характеризуется своей фрактальной размерностью и плотностью границы, а структурное состояние материала представляет бинарное множество этих параметров $\{p_i, D_i\}$, которое в одноименных координатах отображается в виде совокупности точек – «облака».

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 приведены микроструктуры исследуемых областей стружкообразования, отражающие разную степень деформационного изменения срезаемого слоя, начиная с исходного материала и заканчивая сформированной стружкой за зоной ее контакта с передней поверхностью режущего клина. Результаты обработки этих микрофотографий представлены на рис. 2 в виде графического отображения бинарного множества $\{p_i, D_i\}$ зерен и фрагментированных элементов (кластеров) в одноименных координатах.

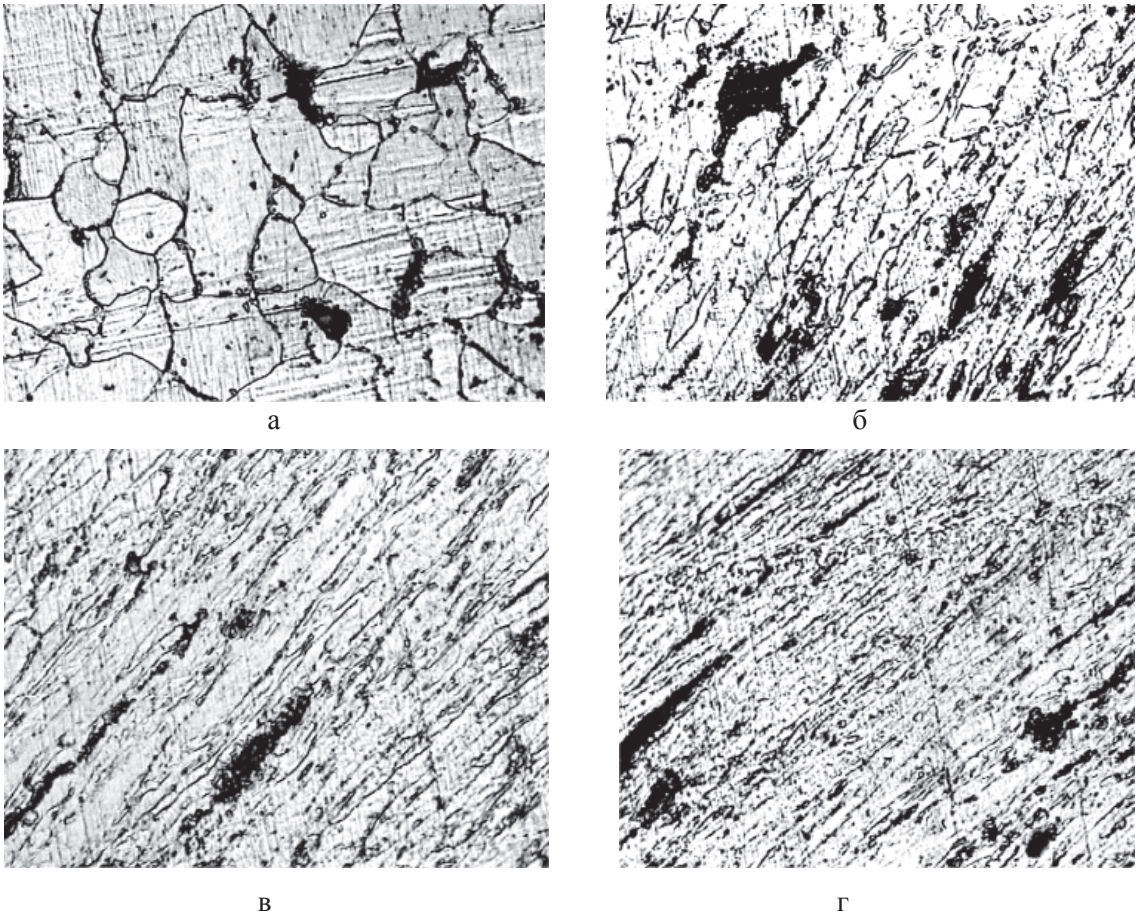

Рис. 1. Микроструктура стружки на разной стадии деформационного процесса (x1000): а – исходная микроструктура; б – начальная зона сдвига; в – верхняя зона сдвига; г – сформированная стружка

Фрактальная размерность и плотность границ являются количественными показателями степени развитости границ, но отражают разные стороны этого свойства. Плотность границ характеризует общую протяженность границ раздела и учитывает геометрические особенности структурного объекта, его размеры и форму, а фрактальная размерность – степень отклонения реальной границы от прямой линии. Плотность границ имеет термодинамическую интерпретацию как соотношение поверхностной и внутренней энергий зерна или кластера, находящихся в устойчивом состоянии. Приращение химического потенциала приводит к увеличению поверхностной энергии структурного образования, которое обеспечивается за счет повышения площади границы раздела и рассматривается как повышение степени ее развитости [4]. Таким образом, плотность границ отражает степень равновесности и устойчивости структуры, а фрактальная размерность – само значение поверхностной энергии границы раздела структурного образования.

Так как границы зерен и границы раздела кластеров выполняют функцию интерфейса, то по динамике их изменения можно анализировать деформационные процессы стружкообразования.

Исходное строение обрабатываемого материала представляет равновесную ферритоперлитную структуру доэфтектоидной стали, зерна которой характеризуются высокой степенью равноосности и широким диапазоном изменения их среднего диаметрального размера. Область первичных пластических деформаций срезаемого материала условно разбивают на несколько зон. Активность деформационного процесса по мере продвижения стружки вдоль передней поверхности режущего клина возрастает, достигая максимума в области сдвига, а затем резко падает [5]. Пластическая деформация срезаемого материала начинается со сжатия, которое приводит к генерации линейных дефектов кристаллического строения, образованию текстуры деформации и повышению степени развитости межзеренных границ за счет выхода на них дислокаций.

С дальнейшей деформацией плотность линейных дефектов достигает предельной величины, зеренная текстура ориентируется в направлении плоскости сдвига, при этом мелкие зерна сливаются с границами более крупных зерен. На межзеренных границах при травлении наблюдаются места разрыва, это указывает на относительно высокую степень когерентности кристаллических решеток соседних зерен на этих участках. Происходящие изменения отражаются в увеличении фрактальной размерности и незначительном снижении плотности границ зерен, что наглядно проявляется на рис. 2 в виде смещения «облака» 2 относительно «облака» 1.

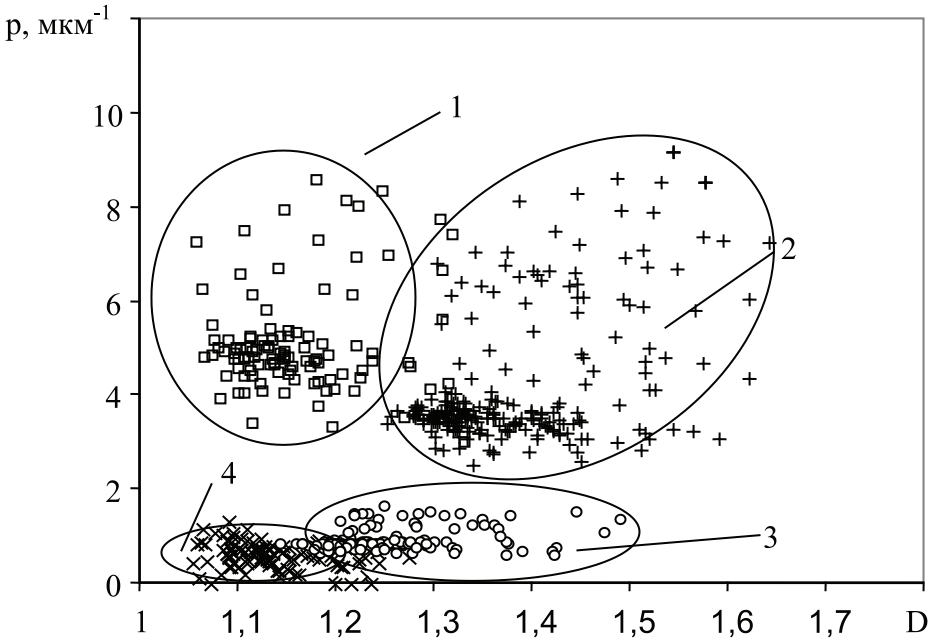

Рис. 2. Фрактальная размерность и плотность границ зерен и фрагментированных элементов на разной стадии развития стружки: 1 – исходная структура; 2 – начальная зона сдвига; 3 – верхняя зона сдвига; 4 – сформированная стружка

Дальнейшая фрагментация происходит в зоне сдвига по плоскостям скалывания, вдоль которых происходит сдвиговое смещение предварительно деформированного и упрочненного материала. Срезаемый слой подходит к зоне сдвига в таком структурном состоянии, при котором отсутствует запас пластичности, и сдвиг происходит скачкообразно, вызывая одновременный разрыв атомарных связей по всей плоскости сдвига, при этом сама плоскость сдвига принимает прямолинейную форму, а фрагменты сдвига – форму тонких пластин. Этот процесс протекает за короткий период времени, порядка $10^{-4}…10^{-5}$ с, поэтому в теории резания металлов его называют скалыванием. На подобный механизм разрушения между фрагментированными элементами указывает количественная величина смещения вдоль плоскостей скалывания, достигающая величин, на десятки порядков превосходящих параметр кристаллической решетки, что невозможно при простом деформационном сдвиге. Плотность фрагментированных элементов принимает различное значение по сечению стружки, при этом наблюдается корреляция между степенью деформации и плотностью фрагментированных элементов.

Выделяющееся тепло способствует частичному восстановлению отдельных атомарных связей, в результате граница между фрагментами скалывания принимает характер чередующихся мостиков с высокой и низкой кристаллографической когерентностью относительно кристаллической решетки фрагментов, сохраняя при этом достаточно высокую подвижность. На рис. 1, г границы между фрагментированными кластерами видны в виде совокупности параллельных прямолинейных полос, ориентированных вдоль направления скалывания, а зеренная структура кластеров уже не просматривается оптической микроскопией. На рис. 2 «облако» 3 представляет бинарное множество $\{p_i, D_i\}$ границ кластеров, численные значения которых ощутимо ниже по сравнению с показателями зеренной структукры. Низкая фрактальная размерность границ кластеров объясняется наличием прямолинейных участков, фрактальная размерность которых равна единице.

В пределах длины контакта стружки с передней поверхностью фрагментированные элементы подвергаются дополнительной деформации. Силы трения тормозят перемещение фрагментированных элементов вдоль передней поверхности режущего клина, а набегающая стружка давит на них, формируя поля сжимающих напряжений. Фрагментированные элементы сжимаются, и некоторые из них выталкиваются из общей пачки и смещаются друг относительно друга в различных поперечных направлениях. Преимущественными направлениями смещения фрагментированных элементов являются нормаль к передней поверхности инструмента.

Смещения в поперечных направлениях могут носить циклический характер, образуя на наружной и боковой поверхности стружки мезо- и макрорельеф периодичной формы. Самоорганизация этого процесса проявляется в образовании чередующихся комбинаций фрагментированных пластин, внутри которой проявляется высокая степень упорядоченности. В состав упорядоченной комбинации входят фрагменты, смещенные перпендикулярно направлению схода стружки, повторяющиеся через определенный шаг. Циклический вид поперечного смещения указывает на волновой характер функционирования сжимающих напряжений или циклический характер перемещения набегающей стружки. Источником такого волнового процесса является сама зона сдвига, которая вначале накапливает определенную упругую энергию, а потом сбрасывает ее в момент разрыва атомарных связей по плоскости сдвига.

Высокая подвижность границ кластеров и частичное восстановление атомарных связей вдоль плоскости скалывания проявляются в ощутимом снижении фрактальной размерности и плотности границ между фрагментированными элементами стружки. На рис. 2 эта область представлена «облаком» 4.

На основании результатов, приведенных на рис. 2, следует, что деформационное развитие границ зерен при стружкообразовании происходит в направлении увеличения бинарных компонент множества $\{p_i, D_i\}$, а границ фрагментированных элементов (кластеров) – наоборот, в направлении их снижения. Взаимное расположение графических отображений бинарных множеств $\{p_i, D_i\}$ различных стадий стружкообразования раскрывает динамику развития диссипативных процессов и его доминирующий структурный механизм. При пластической деформации срезаемого слоя до зоны сдвига диссипация происходит за счет потока линейных дефектов кристаллического строения и зернограничного смещения [6]. По мере повышения степени развитости границ зерен диссипативная активность этих механизмов снижается. В зоне сдвига происходит формирование фрагментированных элементов, разделенных прямолинейными границами раздела, по которым происходит разрыв атомарных связей и осуществляется перемещение кластеров. Диссипативная активность в этом случае

происходит за счет работы разрыва атомарных связей и смещения кластеров. С повышением степени деформации плотность фрагментированных элементов стружки возрастает, повышая диссипативную активность мезомасштабного уровня. Снижение компонент бинарного множества $\{p_i, D_i\}$ границ раздела фрагментированных элементов стружки указывает на их высокую подвижность и, как следствие, высокую активность.

Заключение

В поликристаллическом материале границы раздела выполняют функцию структурного интерфейса и могут быть количественно представлены в виде бинарного множества, включающего фрактальную размерность и плотность границ раздела. Количественный структурный анализ стружкообразования показывает, что пластическая деформация до зоны сдвига сопровождается измельчением зерна и повышением степени развитости межзеренных границ, а диссипация осуществляется за счет дислокационной динамики и зернограничного скольжения. В области сдвига образуются фрагментированные элементы стружки, плотность которых повышается по мере повышения степени пластической деформации. Низкая степень развитости границ раздела кластеров указывает на их высокую подвижность и диссипативную активность.

Список литературы

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т.1. – 298 с.; Т.2. – 320 с.

2. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балахонов, А.В. Болеста, М.П. Бондарь и др.; отв. ред. В.Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.

3. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, Л.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

4. Ким В.А. Исследование деформационных свойств обработанной поверхности / В.А. Ким, Е.Б. Щелкунов, Т.А. Отряскина. // «Металлообработка». – 2010. – № 6. – С. 35–38

5. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.

6. Якубов Ф.Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким – Симферополь: Учпедгиз (Крымское отделение), 2005. – 300 с.

7. Ким В.А. Мезомеханика процесса стружкообразования / В.А. Ким, Т.А. Отряскина // Ученые записки КнАГТУ «Наука о природе и технике». – 2010. – № 2. – С. 88–92

References

1. Physical Mesomechanics materials and computer design / V.E. Panin, V.E. Egorushkin, PV Makarov and others Novosibirsk: Nauka, 1995. Vol.1. 298 p.; Vol. 2. 320.

2. Surface layers and internal interfaces in heterogeneous material Lakh / R.R. Balakhonov, A.V. Bolesta, M.P. Bondar and others; Num. Ed. V.E. Panin. The Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2006. 520.

3. Ivanova V.S. Synergetics and Fractals in Materials / V.S. Ivanova, L.S. Balankin, I.J. Bunin, A.A. Oksogoev Moscow: Nauka, 1994. 383 p.

4. Kim V.A. Study of the deformation properties of the treated surface / V.A. Kim, E.B. Wireworms, T.A. Otryaskina // Metal. 2010. no. 6. pp. 35–38.

5. Zorev N.N. Questions mechanics of metal cutting process. M.: Mashgiz, 1956. 368.

6. Yakubov F.Y. Structural and energetic aspects of strengthening and increasing the resistance of the cutting tool / Yakubov F.Y., Kim V.A. Simferopol: Uchpedgiz (Crimean Branch), 2005. 300.

7. Kim V.A. Mesomechanics process of chip / V.A. Kim, T.A. Otryaskina // Proceedings of KnAGTU The Science of nature and technology. 2010. no. 2. pp. 88–92.

Рецензенты:

Еренков О.Ю., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Химическая технология и биотехнология», ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск;

Черномас В.В., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией «Проблемы металлотехнологий», УРАН ИММ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре.

Работа поступила в редакцию 18.04.2014.