

Ким В.А., Отряскина Т.А.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ
НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Ким В.А., Отряскина Т.А.

V.A. Kim, T.A. Otryaskina

**ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ
НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

**THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION IN METALS DURING CUTTING
UPON THE MICROSTRUCTURE OF THE SURFACE LAYER**



Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Mr. Vladimir A.Kim – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Отряскина Татьяна Александровна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Ms. Tatiana A.Otryaskina – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация: Используя методику компьютерной металлографии и количественного описания интерфейса структурного состояния поликристаллического материала, выполнен анализ микроструктуры обработанной поверхности при резании металлов. Установлено влияние скорости резания на количественные характеристики микро- и мезоструктур поверхностных слоев.

Summary: Using the methods of computer-aided metallography and quantitative description of the interface of structural condition of a polycrystalline material, the analysis of the microstructure of the processed metal surface at cutting is done. It is found that the speed of cutting impacts the quantitative parameters of micro- and mesa-structures in the surface layers.

Ключевые слова: металлография, интерфейс структурного состояния, резание металлов, пластическая деформация, текстура.

Keywords: metallography, the interface of structural condition, metal cutting, plastic deformation, grain.

УДК 539.374:621.9

Введение

Интенсивная пластическая деформация и температура при резании материалов определяют качество механической обработки, которая прямым образом связана с микро- и мезоструктурой поверхностного слоя. Физическая мезомеханика рассматривает кинетику структурных изменений материала при механическом воздействии как динамическую систему разномасштабных потоков дефектов кристаллического строения и других носителей пластической деформации и раскрывает важное понятие – интерфейс структурного состояния. Под интерфейсом структуры понимают комбинацию структурных элементов, наиболее полно отражающих деформационно-температурные изменения в материале и его состояние. В поликристаллических и гетерогенных материалах к ним относят форму зерен и отдельных фаз, границы их раздела, а также характер распределения точечных объектов. Из перечисленных структурных характеристик наибольшей информативностью обладают границы раздела зерен и фаз, которые по праву называют интерфейсом структуры [4; 5].

Обоснование количественных показателей интерфейса структурного состояния

Развитие структуры определяется стремлением ее свободной энергии к минимуму, в приложении к замкнутым границам раздела поликристаллического материала это условие представляется как [5]

$$\Delta F = \sum_{i=N} (S \cdot \gamma - V \cdot \mu)_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S и V – площадь поверхности и объем i -го микроструктурного образования, γ и μ – удельная поверхностная энергия и химический потенциал; N – общее количество микрообъектов в заданном объеме.

Условие (1) в дифференциальной форме принимает вид:

$$d(\Delta F) = 0. \quad (2)$$

Площадь поверхности микрообъекта можно представить фрактальным соотношением [3]:

$$S \propto \Delta^D, \quad (3)$$

где Δ – средний диаметральный размер; D – фрактальная размерность.

Из (2) с учетом (3) вытекает соотношение, соответствующее условию развития наиболее вероятной структуры:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D}{3} \cdot \frac{S}{V} \right)_i \propto \frac{\mu}{\gamma}. \quad (4)$$

Полученная зависимость (4) является количественным показателем организации микроструктуры (Q_C), соответствующим минимуму приращения свободной энергии, который определяется соотношением химического потенциала к удельной поверхностной энергии.

Металлографический шлиф представляет срез объемной структуры материала в некоторой плоскости сечения, поэтому показатель Q_C в приложении к плоскостному отображению структуры принимает вид:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D_{\Gamma}}{2} \cdot \frac{P_3}{S_3} \right)_i, \quad (5)$$

где D_{Γ} – фрактальная размерность границы раздела; P_3 и S_3 – периметр и площадь микрообъекта в плоскости металлографического шлифа.

Плотность границ раздела представляет отношение:

$$q = \frac{P}{S}. \quad (6)$$

Тогда (5) окончательно примет вид:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D_{\Gamma}}{2} \cdot q \right)_i. \quad (7)$$

При наличии фрактальной взаимосвязи между различными масштабными уровнями структуры показатель Q_C применим и для анализа как микро-, так и мезоструктуры.

Пластическая деформация материала приводит к повышению плотности дефектов кристаллического строения и, как следствие этого, увеличению химического потенциала μ . Минимальная величина приращения свободной энергии в этом случае обеспечивается за счет увеличения поверхностной энергии границ раздела. Удельная поверхностная энергия определяется типом кристаллической решетки и характером атомарной связи и незначительно изменяется с повышением химического потенциала [1; 2]. Поэтому баланс между внутренней и поверхностной энергией структурного образования обеспечивается за счет роста площади границы раздела или повышения ее развитости. Количественно это проявляется в увеличении фрактальной размерности D_{Γ} и плотности q границ раздела. Следовательно, количественный показатель организации структуры Q_C характеризует внутреннюю энергию и плотность дефектов кристаллического строения. Любые структурные процессы, приводящие

Ким В.А., Отряскина Т.А.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

к повышению химического потенциала и плотности дефектов кристаллического строения, приводят к росту показателя Q_C .

Современные компьютерные средства обработки изображений позволяют определять по фотографиям мезо- и микроструктур все необходимые количественные характеристики для расчета показателя Q_C .

Цель настоящей работы – количественное описание (с использованием компьютерной металлографии) поверхностных структур, сформированных при точении, и их связь с режимами резания и деформационными процессами.

Методика исследования

Заготовки в виде диска толщиной 5 мм из стали 3 подвергались радиальному точению резцом из Т15К6 на разных скоростях в диапазоне 600...800 м/мин. Корни стружек получали с помощью специальной установки – откидного резца [6]. Корень стружки отрезался от заготовки вместе с примыкающей к нему обработанной поверхностью, заливался в цилиндрической стальной капсуле сплавом Вуда и подвергался металлографическому исследованию.

Микроструктура определялась на микроскопе «Микро-200» при 400 кратном увеличении. 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, пространственную калибровку в соответствии с кратностью увеличения, измерение площади (S_i) и периметра (P_i) каждого микроструктурного образования и фрактальную размерность границ (D). На одной фотографии микроструктуры фиксировалось от 400 до 4500 объектов микроструктуры. По полученным результатам вычислялись плотность границ по формуле (6) и количественный показатель организации структуры Q_C по формуле (7).

На рис. 1 представлены фотографии микроструктур стали 3 в исходном состоянии и поверхностного слоя, сформированного при различных скоростях точения, там же изображены результаты компьютерной обработки по выделению границ раздела («скелетированные» отображения).

Для определения количественного характера распределения микроструктуры по глубине поверхностный слой разбивался на зоны толщиной 25 мкм и шириной, равной ширине зафиксированной области. В каждой зоне рассчитывались количественные характеристики микроструктур по формулам (6) и (7) и их средние значения. Глубина залегания зоны от поверхности определялась как координата центра ее площади. Полученные результаты представлены на рис. 2, 3 и 4.

Результаты и их анализ

Сравнительный анализ микроструктур (см. рис. 1) материала в исходном состоянии и поверхностных слоев, сформированных при точении, показывает следующее.

Исходную микроструктуру обрабатываемого материала можно в целом охарактеризовать как равновесную. Данное заключение обосновывается тем, что большинство зерен имеет форму, близкую к равноосной. Стыковка зерен между собой осуществляется по вершинам с тройными углами, близкими к 120^0 , что, согласно закону Херинга, соответствует равенству химических потенциалов структурного состояния в соседних зернах [4]. Количественно такая структура характеризуется низкой плотностью (q) и малой величиной фрактальной размерности (D) границ раздела. Плотность границ раздела (q) отражает структурно-энергетическое состояние кристаллита или его химический потенциал, а фрактальная размерность (D) - структурно-энергетическое состояние границы раздела или суммарную величину ее поверхностной энергии.

На рис. 2, 3 и 4 исходная структура обрабатываемого материала представляет крайнюю правую точку, в которой пересекаются кривые 2, 3 и 4, соответствующие микроструктурам 2, 3 и 4 на рис. 1.

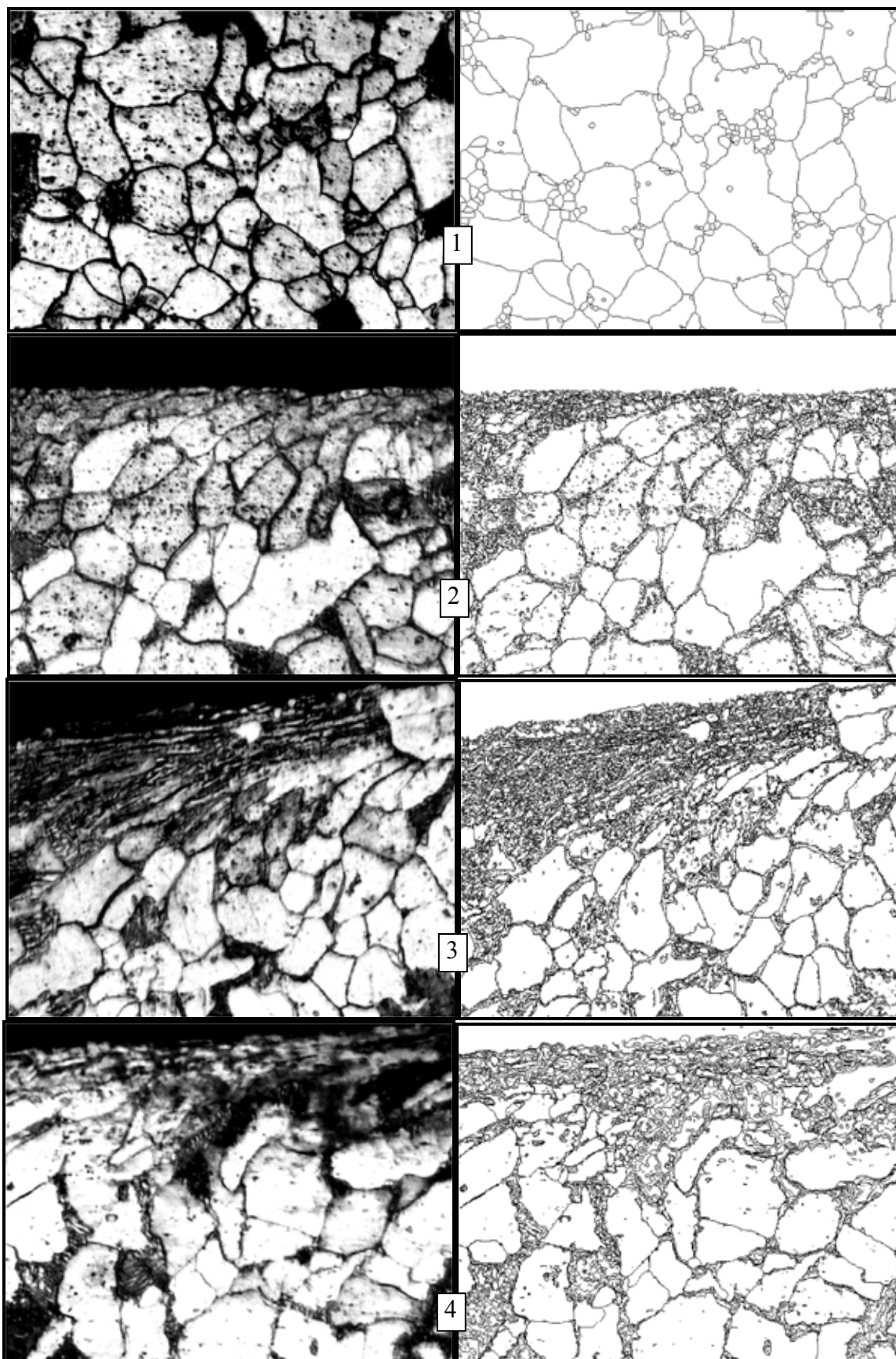


Рис. 1. Поверхностные микроструктуры образцов из стали 3 и их «скелетированное» представление (x400): 1 – в исходном состоянии; 2 – точение на $V = 600$ м/мин, $S = 0,085$ мм/об; 3 – точение на $V = 800$ м/мин, $S = 0,085$ мм/об; 4 – точение на $V = 800$ м/мин, $S = -0,115$ мм/об

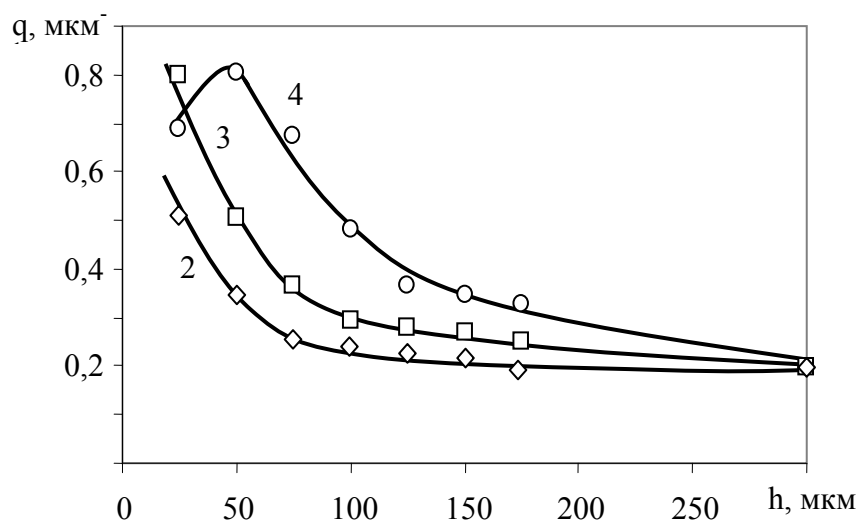


Рис. 2. Распределение плотности границ раздела по глубине обработанной поверхности

Микроструктура поверхностного слоя, сформированная при точении, отличается высокой структурно-энергетической неоднородностью, которая проявляется в неравноосности зерен и значительном отклонении углов при вершине тройных стыков от равновесных значений, при этом больший угол соответствует большей величине химического потенциала внутри кристаллита.

Пластическая деформация сопровождается деформационным разворотом зерен, изменением их формы и разбивкой на более мелкие фрагменты. Зоны активных пластических деформаций распределены неравномерно, их локализация преимущественно происходит в зоне вокруг стыка между крупными зернами или объединением зерен (кластеров).

При деформационной разбивке крупных зерен часто наблюдается образование прямолинейных границ раздела, указывая, что первоначально возникает плоскость сдвига двойникового типа или полигональная субграница, которая в дальнейшем развивается до уровня высокоугловой границы раздела. Возникающие при такой разбивке границы между зернами первоначально сохраняют геометрию субграницы. Зерна, разделенные такой границей, отличаются повышенной «сцепляемостью» между собой и образуют мезомасштабный кластер с подвижной внешней границей раздела.

В результате мезомасштабного скольжения образуются упорядоченные границы, близкие по форме к прямолинейным, отличающиеся высокой подвижностью, между которыми располагаются текстурированные кластеры деформации. Положение границ раздела между текстурированными кластерами отражает направление деформационного смещения обрабатываемого материала поверхностного слоя на мезомасштабном уровне, инициированного процессом резания. При приближении к обработанной поверхности плотность границ раздела возрастает, и только у структуры, сформированной на режимах $V = 800$ м/мин и $S = 0,115$ мм/об, наблюдается незначительное снижение этой характеристики.

На рис. 3 приведен характер распределения фрактальной размерности границ раздела D по глубине обработанной поверхности. Видно, что в области, охваченной пластической деформацией, происходит резкий подъем фрактальной размерности, а снижение этого показателя у самой поверхности указывает, что в данной зоне формируются микроструктуры, границы раздела которых характеризуются большей упорядоченностью и меньшей развитостью. Направление границ раздела в этой области стремится к параллельности вектору скорости резания. Образование таких границ раздела вызвано высокой температурой и более

интенсивной пластической деформацией за счет трения обработанной поверхности с задней поверхностью режущего клина. Процессы отпуска в этом слое отражаются на микроструктуре и физико-механических свойствах кристаллитов, пластическая деформация которых из-за высокой температуры происходит при меньших контактных напряжениях.

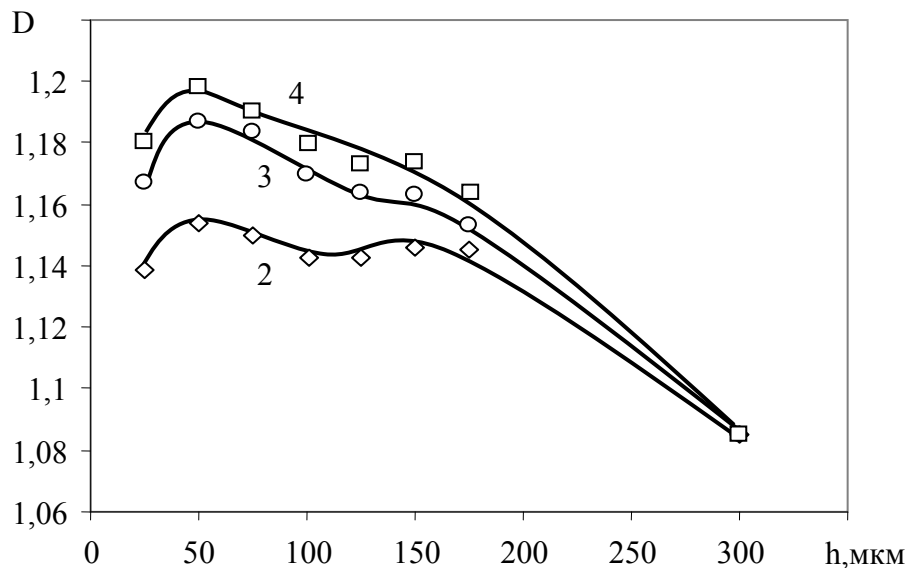


Рис. 3. Распределение фрактальной размерности границ раздела по глубине обработанной поверхности

Снижение фрактальной размерности в слое, примыкающем к обработанной поверхности, указывает на начало локального повышения равновесности микроструктуры за счет снижения ее химического потенциала, который в суммарном выражении может еще достигать больших величин за счет внутренних концентраторов напряжений в самом кристаллите. Суммарное структурно-энергетическое состояние материала отражается показателем структурной организации (Q_c), объединяющей плотность границ (q) и фрактальную размерность (D) всех микрообъектов, находящихся в пределах одного микроснимка. На рис. 4 видно, что, не смотря на зафиксированное снижение фрактальной размерности в зоне у поверхностного слоя во всех исследованных случаях, уменьшение показателя структурной организации Q_c наблюдается только при точении на режимах $V = 800$ м/мин, $S = 0,115$ мм/мин.

Активность пластической деформации зависит от режимов резания и условий контактного взаимодействия. С повышением скорости резания характер распределения плотности и фрактальной размерности границ раздела по глубине сохраняется, но сами их численные значения возрастают.

На микроструктуре обработанных поверхностей наблюдается высокая плотность точечных объектов по сравнению с исходной структурой. Учитывая, что режимы подготовки шлифов и их травление производились в одних и тех же условиях, можно предположить, что подобные точечные образования являются или следами выхода дислокаций или микролокальными зонами концентраций напряжений вокруг других дефектов кристаллического строения, вызванных пластической деформацией. При приближении к поверхности плотность точечных образований возрастает.

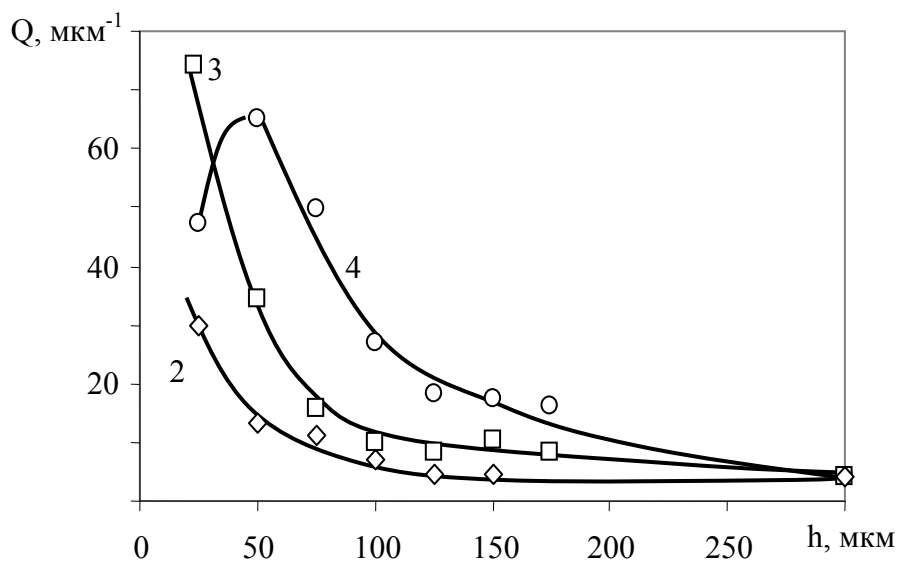


Рис. 4. Распределение показателя структурной организации по глубине обработанной поверхности

Выводы

Компьютерная обработка микроструктур поверхностных слоев, формирующихся при обработке материалов резанием, выявляет деформационные процессы, включающие разбивку зерен, их ротационный разворот и развитие границ мезоструктур.

Наибольшую информацию о предыстории развития структуры и ее состоянии несут границы зерен и фаз, выполняют своеобразную функцию микроструктурного интерфейса, который количественно описывается плотностью границ раздела (q), фрактальной размерностью (D) и показателем структурной организации (Q_C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вест, А. Химия твердого тела. Теория и приложения: в 2 ч. Ч. 1 / А. Вест; пер с англ. – М.: Мир, 1988. – 558 с.
2. Жуховицкий, А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. – М.: Metallurgia, 1987. – 688 с.
3. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
4. Кристиан, Д. Теория превращения в металлах и сплавах / Д. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
5. 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.
6. Щелкунова, М.Е. Диагностика состояния режущего инструмента на основе вероятностных и информационных параметров акустической эмиссии и термо-ЭДС: диссертация канд. техн. наук / М.Е. Щелкунова. – Комсомольск-на-Амуре, 2000. – 120 с.