

УДК 621.9.011

**ДЕФОРМАЦИОННО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ****В. А. Ким<sup>1</sup>, Т. А. Отряскина<sup>2</sup>, Е. В. Самар<sup>3</sup>**<sup>1</sup> kmtnm@knastu.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступило в редакцию 22.07.2013*

**Аннотация.** Предложены количественные показатели интерфейса структурного состояния, позволяющие анализировать деформационные процессы стружкообразования и формирования обработанной поверхности. Показана роль мезомасштабного уровня в развитии диссипативных структур и обеспечении качества механической обработки.

**Ключевые слова:** резание; интерфейс структурного состояния; мезомасштабный уровень.

**ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ  
КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ**

В основе обработки материалов резанием лежат процессы пластической деформации и разрушения, протекающие с высокими и сверхвысокими скоростями. В настоящее время пластическая деформация твердых тел рассматривается с позиций физической мезомеханики – нового и активно развивающегося направления физики твердого тела и теории разрушения. Физическая мезомеханика базируется на термодинамике неравновесных процессов и предполагает наличие множества разномасштабных носителей пластической деформации, образующих диссипативные потоки. В неравновесных процессах пластической деформации мезомасштабному уровню отводится особая роль в функционировании активных диссипативных структур. Носителями пластической деформации в этом случае являются сдвиги по границам зерен и их объединений – кластеров [1]. Плотность энергетического диссипативного потока ( $A_{\text{дис}}$ ) определяется работой внутреннего трения

$$\text{дис} \quad \text{—} \quad (1)$$

где  $\Delta_i$  – средний диаметральный размер зерна или кластера;  $D$  – фрактальная размерность границ;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $N$  – общее количество микро- и мезоструктурных объектов в объеме  $V$ .

Числитель выражения (1) представляет суммарную длину границ раздела между зернами и кластерами, с увеличением которой плотность потенциально возможного диссипативного потока возрастает.

Для описания синергетических процессов мезомасштабного уровня разработан математический аппарат, позволяющий моделировать поведение материала при пластической деформации и прогнозировать его физико-механические свойства [2].

Приложение физической мезомеханики к резанию материалов позволяет глубже понять физику этого процесса и раскрывает новые пути прогнозирования и моделирования структурных изменений при стружкообразовании и формировании качества механической обработки. Процесс резания металлов является с одной стороны объектом исследования физической мезомеханики, с другой – удобным методическим приемом моделирования высокоскоростных деформационных процессов.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследования проводились при тчении низко- и среднеуглеродистых сталей резцами, оснащенными пластинками из оксидной керамики ВСК60. Корни стружек получали с помощью приспособления «откидной резец». Обработка производилась на чистовых режимах при скоростях  $V = 5,0 \dots 14,0$  м/с и подаче  $S = 0,085$  мм/об. Для количественной оценки структурных превращений поликристаллических материалов при пластической деформации

и термическом воздействии использовались показатели интерфейса структурного состояния, определяемые методом компьютерной металлографии по цифровым изображениям микроструктур [3].

Цифровые изображения исследуемых структур получали на металлографическом микроскопе «Микро-200» при 400- и 1000-кратном увеличении. Обработка изображений микроструктур осуществлялась с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1. Программа предусматривала выполнение следующих процедур: корректировку резкости, снятие контрастной маски, выделение границ зерен и других микроструктурных объектов, калибровку в соответствии с масштабом увеличения, вычисление периметра ( $P_i$ ) и площади каждого микроструктурного объекта ( $F_i$ ), фрактальной размерности границ зерен и раздела фаз ( $D_i$ ) и количество микроструктурных объектов ( $n$ ) на единичной площади поверхности металлографического шлифа. Один снимок фиксировал при увеличении  $\times 400$  площадь поверхности шлифа  $250 \times 280$  мкм<sup>2</sup>, на которой располагалось от 500 до 2500 микрообъектов, поэтому математическая обработка изображений предусматривала использование статистических показателей.

Под фрактальной размерностью линейного объекта  $D$  понимают показатель степенной зависимости интегрального распределения количества отрезков определенной длины, принятой за меру масштабного порядка, уложенных вдоль исследуемой кривой [6]. Фрактальная размерность характеризует степень различия кривой относительно прямой линии, имеющей фрактальную размерность, равную 1, поэтому  $1 < D < 2$ . В материаловедении фрактальная размерность границ выступает как количественный показатель ее развитости [7].

Для количественной оценки интерфейса структурного состояния исследуемого объекта на микро- и мезомасштабном уровне использовались следующие характеристики:

- плотность границ зерен и раздела фаз — (2)

- параметр структурной организации — (3)

Микротвердость обработанного поверхностного слоя измерялась на микротвердомере НМV при нагрузке 0,49 Н.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокая скорость и степень пластической деформации срезанного слоя приводит к тому,

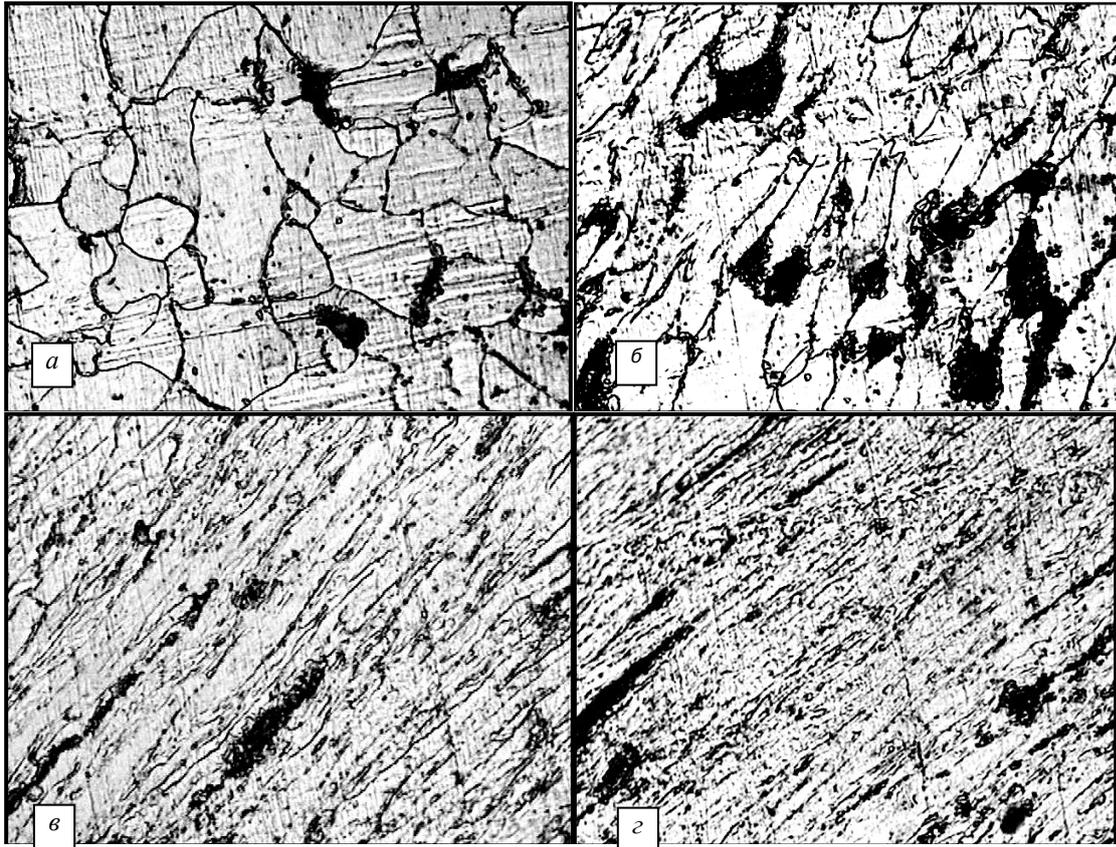
что структура стружки отличается от традиционного зеренного строения, и для описания интерфейса ее структурного состояния необходимо использовать специальные количественные показатели. Для этого было предложено бинарное множество  $\{q, D\}$ , состоящее из совокупности сопряженных между собой плотности границ каждого микроструктурного объекта ( $q_i$ ) и фрактальной размерности его границ ( $D_i$ ). Отличительной особенностью предлагаемого показателя является возможность количественной оценки как зеренной, так и незеренной структурной организации, наличия в ней статистической компоненты и возможность графического представления.

На рис. 1 представлены микроструктуры срезанного слоя в средней части стружки, где в чистом виде проявляются только деформационно-сдвиговые процессы, соответствующие разной стадии ее развития. Стружка в начальной зоне сдвига еще сохраняет зернистость (рис. 1, б), а после прохождения зоны первичной деформации теряет зеренное строение.

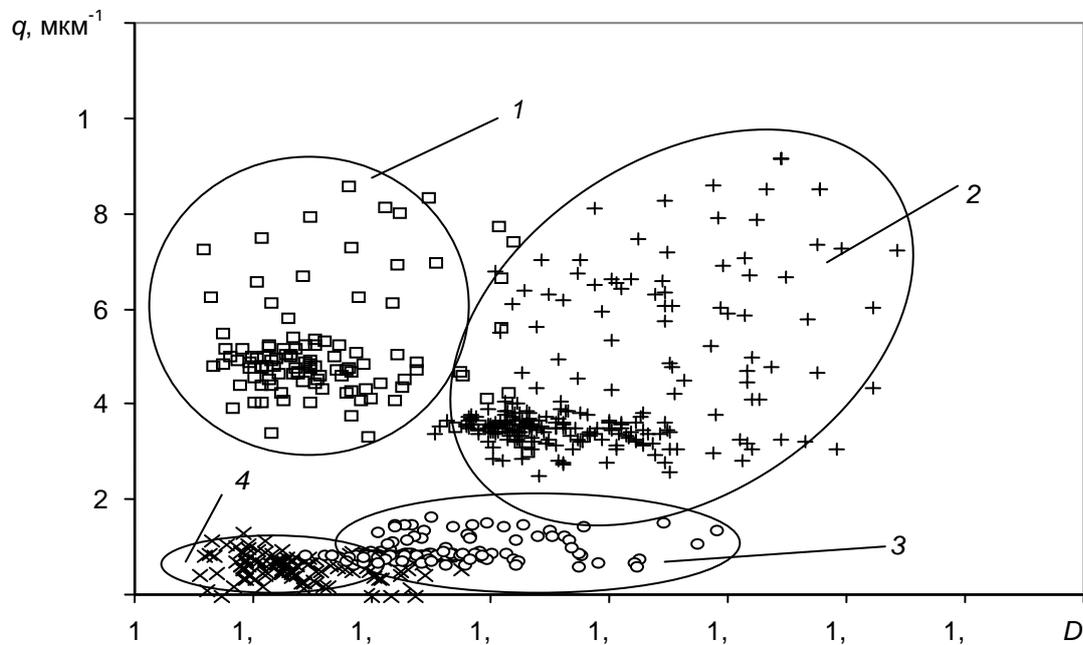
На рис. 2 представлена динамика изменения бинарного множества  $\{q, D\}$  при структурных превращениях срезанного слоя на разных стадиях стружкообразования. При сохранении срезаемым слоем зеренного строения основные деформационные процессы протекают внутри кристаллитов или на микромасштабном уровне. В этом случае с ростом степени пластической деформации наблюдается незначительное изменение средней плотности границ зерен, ощутимое повышение фрактальной размерности и увеличение диапазона рассеивания бинарного множества в целом.

Дальнейшее развитие стружки сопровождается переходом деформационного процесса на мезомасштабный уровень. Структура теряет зеренную организацию и представляется как совокупность фрагментированных мезомасштабных объектов со своими границами раздела. Переход деформационного процесса с микро- на мезомасштабный уровень сопровождается резким скачком изменения бинарного множества. Так, плотность границ фрагментированных элементов почти на порядок падает по сравнению с плотностью границ зерен, а фрактальная размерность более чем в 5,0 раз.

Дальнейшее развитие структуры стружки приводит к незначительному снижению плотности границ раздела и их фрактальной размерности, а также сужению диапазона рассеивания бинарного множества в целом.



**Рис. 1.** Микроструктура стружки при точении стали 3 на разной стадии деформационного процесса ( $\times 1000$ ):  
*a* – исходная микроструктура; *б* – начальная зона сдвига; *в* – конечная зона сдвига;  
*г* – сформированная стружка



**Рис. 2.** Бинарное множество  $\{q, D\}$  на разных стадиях развития стружки:  
*1* – исходная структура; *2* – начальная зона сдвига, *3* – верхняя зона сдвига;  
*4* – сформированная стружка

Фрактальная размерность границ зерен в исходном материале близка к фрактальной размерности границ раздела в сформировавшейся стружке, но они отражают разную структурную организацию. В первом случае фрактальная размерность представляет микроструктурную, а во втором – мезоструктурную организацию. Поэтому характер структурных изменений при деформации необходимо рассматривать только в совокупности фрактальной размерности  $D$  с плотностью границ  $q$ .

Следовательно, переход деформационного процесса с микро- на мезомасштабный уровень сопровождается резким снижением и инверсией направления изменения фрактальной размерности границ раздела. Границы фрагментированных элементов, имеющих низкую фрактальную размерность, являются более активными носителями пластической деформации, характеризуются большей подвижностью при пластическом скольжении. Роль таких границ раздела в формировании диссипативного потока возрастает по мере снижения фрактальной размерности.

На рис. 3 показаны микроструктуры обработанных поверхностей. Выбор высокоскоростных режимов резания обосновывался обеспечением высокой температуры и ее градиента, на фоне которых структурные изменения в обрабатываемом материале протекают более активно и наглядно. Структурные изменения обработанного поверхностного слоя при механической обработке происходят в результате деформационного и термического воздействия, инициированного процессом резания. Формирующаяся структура сохраняет зернистость, но степень искажения формы зерен и их плотность имеют распределение по глубине, соответствующее градиентам деформации и температуры. Нарушение зеренного строения имеет место только в самом верхнем слое, подверженном наиболее активной пластической деформации за счет контактного взаимодействия с задней поверхностью режущего клина. В качестве количественной характеристики интерфейса структурного состояния обработанной поверхности был использован параметр структурной организации  $Q_c$ .

Обработанная поверхность, полученная резанием, проходит все стадии деформационного разномасштабного развития, но степень их завершенности зависит от глубины залегания слоя. Деформация глубинных слоев протекает в основном на микромасштабном уровне, а с при-

ближением к поверхности наблюдается постепенный переход на мезомасштабный. Положение и размер зоны такого перехода определяется режимами резания и контактного взаимодействия обрабатываемого материала с задней поверхностью режущего клина [4].

Мезоструктурная фрагментация обработанной поверхности проявляется в упорядоченной ориентации групп зерен, образующих кластер, объединенных общей границей раздела и формирующей текстуру деформации. Плотность таких границ при приближении к поверхности возрастает, указывая на более высокую степень деформационного текстурирования. Градиентный характер распределения мезоструктур отражается на эпюре изменения параметра  $Q_c$  по глубине (рис. 4).

Распределение микротвердости по глубине обработанной поверхности аналогично характеру изменения параметра  $Q_c$ . И это подтверждается линейной зависимостью между ними, которая принимает вид

$$341. \quad (3)$$

Аналогичные зависимости были получены для ряда конструкционных сталей и сплавов, структура которых формировалась различными видами механической и термической обработки [5].

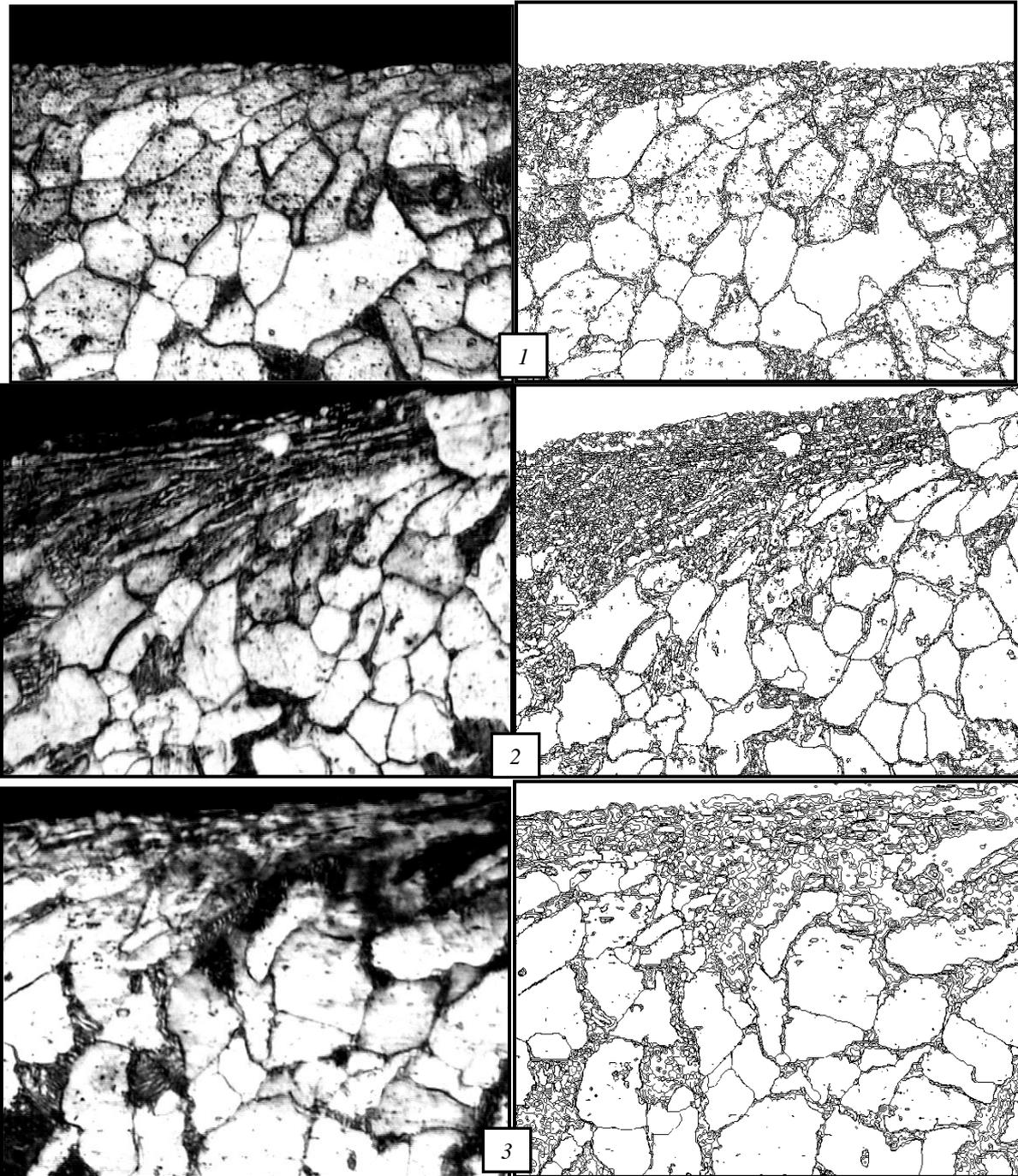
Зависимость глубины деформированного слоя и параметра организации структуры от режимов резания определяли методом факторного планирования эксперимента, на основании которого были получены эмпирические уравнения, которые для конструкционной стали 40X имеют вид

$$, \text{ мкм}^{-1}, \quad (4)$$

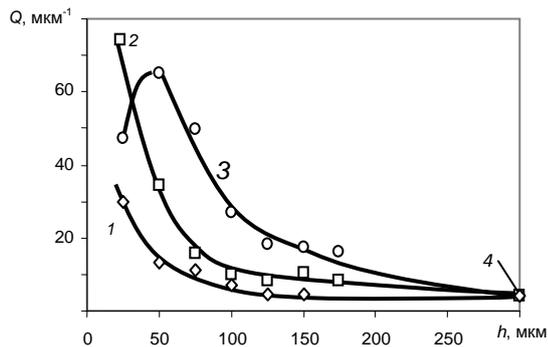
$$^7, \text{ мкм}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об.

Полученные зависимости можно использовать для прогнозирования структурного состояния и физико-механических свойств обработанной поверхности, полученной механической обработкой.



**Рис. 3.** Микроструктура поверхностного слоя (слева) и ее преобразованный вид (справа) с выделенными границами раздела. Точение стали 3 резцом из ВОК60, (x400): 1 – режимы резания  $V = 10$  м/с,  $S = 0,085$  мм/об; 2 –  $V = 13,3$  м/с,  $S = 0,085$  мм/об; 3 –  $V = 13,3$  м/с,  $S = 0,115$  мм/об



**Рис. 4.** Распределение показателя  $Q_c$  по глубине обработанной поверхности (точение стали 3 резцом из ВОК60): 1 – при точении  $V = 10$  м/с,  $S = 0,085$  мм/об; 2 –  $V = 13,3$  м/с,  $S = 0,085$  мм/об; 3 –  $V = 13,3$  м/с,  $S = 0,115$  мм/об; 4 – исходная структура обрабатываемого материала

## ВЫВОДЫ

1. На основе общих принципов физической мезомеханики выявлены и описаны структурно-деформационные стадии стружкообразования и формирования обработанной поверхности, связанные с активностью носителей пластической деформации микро- и мезомасштабных уровней.

2. Показано, что микроструктурные изменения при пластической деформации приводят к повышению развитости границ зерен, а мезоструктурные – к образованию фрагментированных структур и границ раздела между ними с более низкой фрактальной размерностью. Эта закономерность проявляется как при стружкообразовании, так и формировании структуры обработанной поверхности.

3. Дано обоснование количественных показателей микроструктуры, в частности, параметра структурной организации и бинарного множества, включающих плотность границ зерен и их фрактальную размерность, позволяющие описывать процессы деформационных структурных изменений обрабатываемого материала при резании

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балахонов Р. Р. и др.** Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / отв. ред. В. Е. Панин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.
2. **Панин В. Е.** Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука, СИФ РАН, 1995. Т. 1. 298 с.
3. **Ким В. А., Петров В. В., Бутин А. В., Белова И. В., Шпилева А. А.** Количественный структурно-энергетический анализ термообработки конструкционной стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 4. С. 24–26.
4. **Ким В. А., Отряскина Т. А., Щелкунов Е. Б.** Исследование деформационных свойств обработанной поверхности // *Металлообработка*. 2010. № 6 (60). С. 35–39.
5. **Ким В. А., Муравьев В. И., Шпилева А. А.** Зеренная структура и твердость титанового сплава VT20 после электронно-лучевой сварки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 4 (634). С. 40–43.
6. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.
7. **Иванова В. С. и др.** Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, Л. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. М.: Наука, 1994. 383 с.

## ОБ АВТОРАХ

**КИМ Владимир Алексеевич**, зав. каф. материаловедения и технологии новых материалов. Дипл. инж. Д-р техн. наук, проф.

**ОТРЯСКИНА Татьяна Александровна**, ст. преп. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.

**САМАР Елизавета Владимировна**, асп. той же каф. Дипл. инж.

## METADATA

**Title:** Deformation and structural analysis of metal cutting.

**Authors:** V. A. Kim, T. A. Otryaskina, and E. V. Samar.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** kmtnm@knastu.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 10-15, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The quantitative indicators of the structural state of the interface, you can analyze the deformation processes of chip formation and the formation of surface finish. The role of mesoscale level in the development of dissipative structures and ensuring the quality of the machining.

**Key words:** cutting; interface of the structural state; mesoscale level.

## References (English transliteration):

1. R. R. Balakhonov, *Surface layers and internal interfaces in heterogeneous materials*, V.E. Panin Br. Ed. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2006.
2. V. E. Panin, *Physical Mesomechanics and computer design materials*, vol. 1. Novosibirsk: Nauka, NRF, RAS, 1995.
3. V. A. Kim, V. V. Petrov, A. V. Boutin, I. V. Belova, and A. A. Shpilev, "Quantitative structure- energy analysis of structural steel heat treatment," *Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 4, pp. 24-26, 2010.
4. V. A. Kim, T. A. Otryaskina, and E. B. Shchelkunov, "Study of the deformation properties of the treated surface," *Metal*, no. 6 (60), pp. 35-39, 2010.
5. V. A. Kim, V. I. Ants, and A. A. Shpilev, "The grain structure and hardness of titanium alloy VT20 after electron beam welding," *Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 4 (634), pp. 40-43, 2008.
6. B. Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*. Moscow: Institute of Computer Science, 2002.
7. V. S. Ivanova, *et al*, *Synergetics and Fractals in Materials*. Moscow: Nauka, 1994.

## About authors:

**КИМ, Vladimir Alekseevich**, Head. Materials Science and Technology of New Materials Dept. Dr. Tech. Sciences, Prof.

**OTRYASKINA, Tatiana Aleksandrovna**, Art. Ven. Univ. engineering technology.

**SAMAR, Elizaveta Vladimirovna**, PhD Student.