УДК 53.043

К ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВТОРЕЗОНАНСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

© В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, В.Н. Перевезенцев, Л.В. Колик,Н.А.Андрианов,
Институт машиноведения РАН, Россия, Москва

Аннотация. *Даны результаты анализа ряда материалов, подвергнутых ультразвуковой токарной обработке, обеспечиваемой авторезонансным устройством. Представлены фотографии и описаны, в частности, наноструктуры, возникающие в материалах обрабатываемых образцов. Показано, что авторезонансная ультразвуковая обработка приводит к упрочнению поверхностных слоев образцов. Предложен подход к описанию двумерных поверхностных волн в таких слоях.*

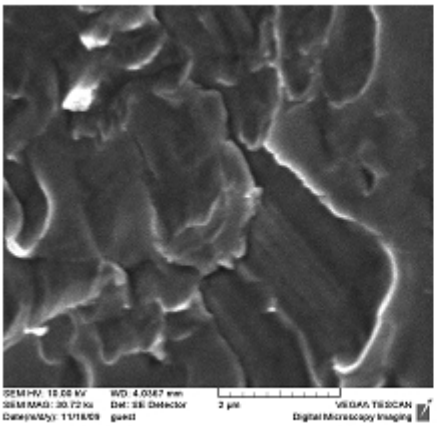
Ключевые слова: *авторезонанс, ультразвуковая обработка, поверхностный слой, наноструктрирование, упрочнение*

1. Проблема получения наноматериалов, предназначенных для различных областей техники, давно является предметом обсуждений в литературе [1]. Было показано, что наноструктурирование поверхностного слоя металлических материалов может обеспечить повышение прочностных характеристик при одновременном увеличении их пластичности. Достижение подобного эффекта помимо формирования наноразмерных структур в поверхностном слое обеспечивается за счет создания так называемого барьерного подслоя, который представляет собой материал с полосовой дислокационной субструктурой, препятствующей проникновению дефектов с поверхности в объем нагружаемого материала [2].

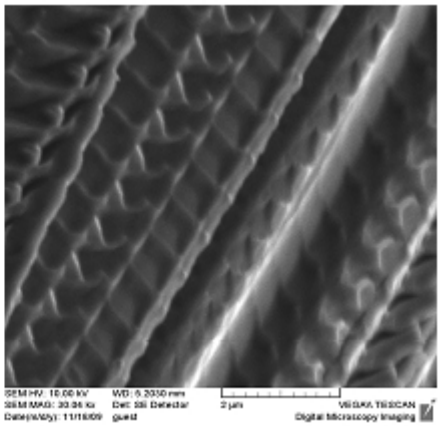
Одним из методов создания наноструктурного состояния в поверхностном слое и обеспечения градиентного изменения характеристик прочности по глубине обработанного материала является ультразвуковая обработка (УЗО) поверхности. Например, было показано[3], что характерной особенностью структуры поверхностного слоя холоднокатаного титана, подвергнутого УЗО, является наличие полосовой дислокационной субструктуры в виде параллельных дислокационных субграниц. В работе [4] использовали ультразвуковую финишную обработку (УФО) для повышения эффективности ионного азотирования стали 40Х13, что связывали с повышением интенсивности протекания диффузионных процессов при увеличении степени дефектности металлических сплавов. При этом были выявлены температурные режимы, обеспечивающие максимальное увеличение микротвердости в упрочненном поверхностном слое, а также показано, что предварительное безабразивное ультразвуковое выглаживание поверхности при последующем ионном азотировании оказывает влияние на увеличение толщины модифицированного слоя на глубину до 25-30 мкм. Также, как правило, что ультразвуковая (финишная) обработка сталей, сопровождается увеличением износостойкости обработанных поверхностей.

2. Одним из самых перспективным способов оказывется обработка ультразвуковым инструментом или ультразвуковая финишная обработка (УФО) с применением авторезонансных источников колебаний [5,6]. При обработке деталей на ультразвуковой

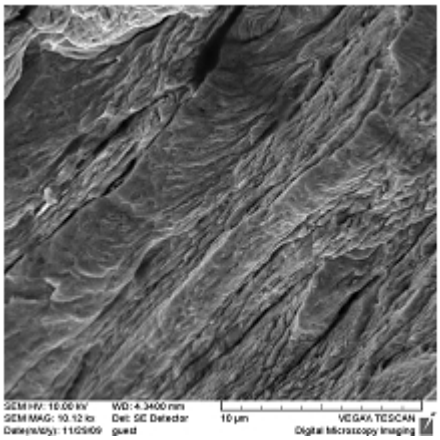
частоте за счет авторезонансного характера обработки эффективность воздействия на материал детали еще более возрастает [7,8]. Появление структур и регулярность поверхностного воздействия при авторезонансном резании металлов хорошо видны на рисунках 1,2,3.



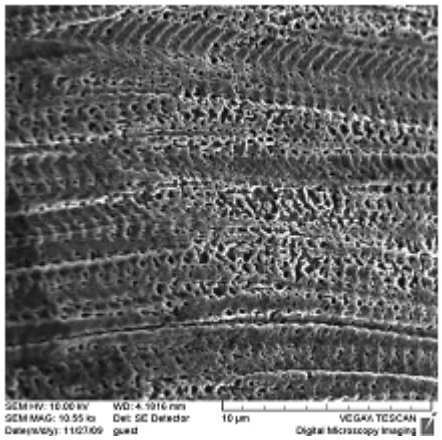
а. Медь без узо



б. Медь с узо



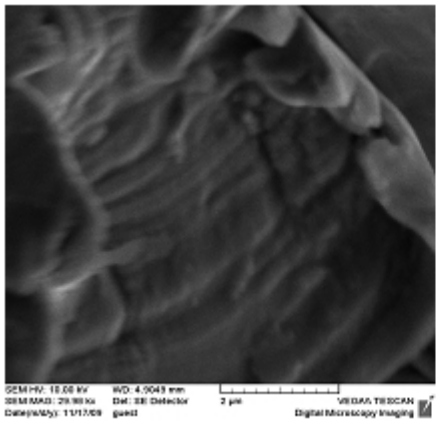
в – без УЗ, травление 10 мин;



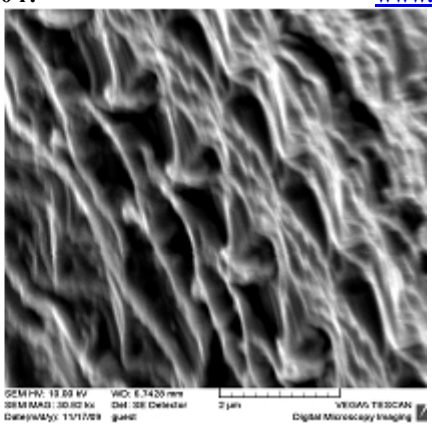
г – УЗ резание, травление 10 мин;

Рис.1

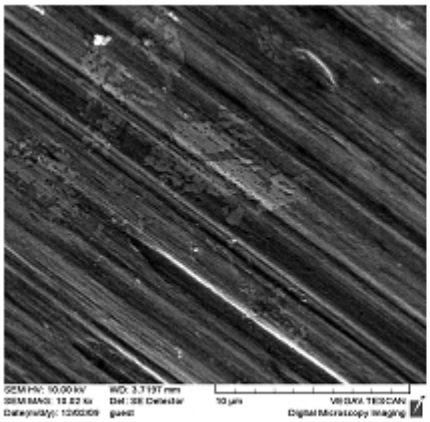
На рис 1а, показан результат обработки меди М2р без ультразвуковых колебаний резца. Четкое структурирование материала показано на рис.1, б, где была использована авторезонансная ультразвуковая схема обработки. Наиболее четко видны упрочняющие наноструктуры после проведения травления образцов. На рис. 1, в показан результат обработки без применения ультразвука (время травления – 10 мин.); протравленный слой при использовании ультразвукового резания (время травления – то же) дан на рис. 1, г. Хорошо видны получившиеся в результате упрочняющие поверхность наноструктуры.



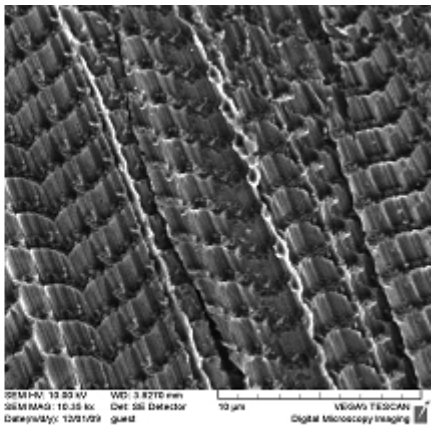
Латунь без уз;



б. С уз;



в. без уз травление;



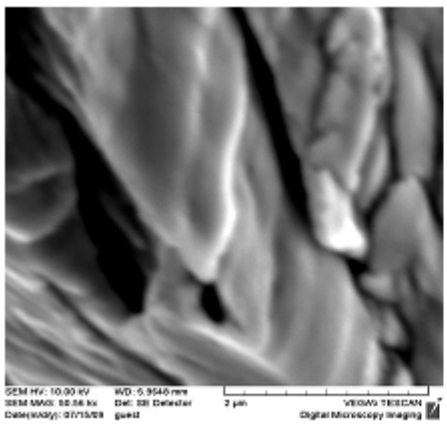
г. уз травление

Рис.2.

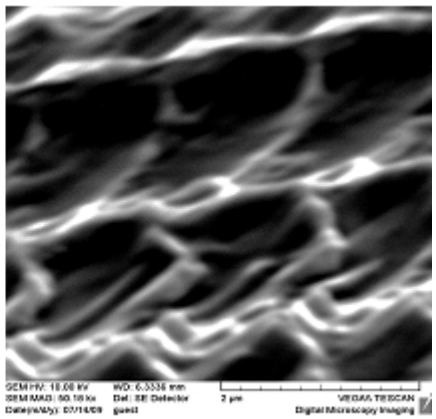
На рис. 2 показаны аналогичные результаты, полученные при изучении латунной стружки ЛС59-1: резание без ультразвука (а.), (б)- авторезонансное ультразвуковое резание; (в и г) – аналогичные результаты с травлением (продолжительность 10 мин.).

Схожие результаты были получены и для других металлов. Например, на рис. 3 показано:

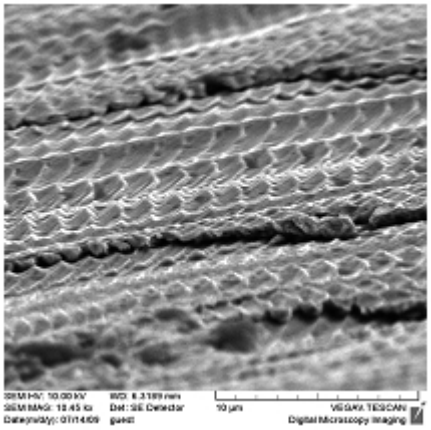
(а) - результат стандартной токарной обработки подкаленной стали Ст45, (б) – токарная обработка в присутствии ультразвука, на рис. (в) – показана картина упрочняющих структур возникающих после авторезонансной ультразвуковой обработки.



а. Сталь без уз



б. С узо



в. Упрочняющие наноструктуры

Рис. 3. Сталь

3. Для получения информации по структурированию и состоянию поверхности после авторезонансной ультразвуковой токарной обработки были изготовлены шлифы и сделаны их оптические (Neofot-32) и электронномикроскопические (РЭМ Tescan) фотографии. С помощью РЭМ Tescan были проведены фрактографические исследования.

На рентгеновском дифрактометре Дрон-3М были измерены размеры областей когерентного рассеяния.

На снимках видны растравленные (и потому тупые) трещины, скачки деформации, «вторая» фаза. Однако зёренная структура при травлении не проявилась. Возможно это вызвано тем, что при образовании стружки в кристаллической решётке зёрен возникло столько дефектов, что их суммарная упругая энергия оказалась сравнима с энергией границ. В результате и зёрна и границы травятся с одинаковыми скоростями.

Фрактограммы стружки после УЗ воздействия свидетельствуют об увеличении вязкости материала (площадь, которую можно характеризовать как ямочное разрушении значительно возросла), об уменьшении количества трещин.

Измерение размеров областей когерентного рассеяния показало, что их размер колеблется от 50 нм до 0,3 мкм и более. Разброс размеров на порядок обусловлен следующим обстоятельством: вблизи свободных поверхностей, образованных движением трещин, упругие поля напряжений от мезодефектов, ответственных за протекание деформационного измельчения структуры, отрелаксировали, в результате чего в этих областях, по-видимому, сохранилась зёренная структура исходного материала с размером зёрен порядка 1 мкм. В других же областях, где деформация протекала с сохранением сплошности, зёренная структура дополнительно измельчилась вплоть до нанокристаллической.

Измерение и расчет микротвердости образцов, после авторезонансного резания приведены в таблице 1. Видно, что все образцы подвергнутые авторезонансной ультразвуковой обработке имеют прирост микротвердости от 10 до 80%.

Таблица 1

	Ребро после арузо		**Середина боковой плоскости**	
	Микротвёрдость Hμ,МПа.	**абсол. ошибка ΔHμ,МПа**	**Микротвёрдость Hμ,МПа.**	**абсол. ошибка ΔHμ,МПа**
Лат. 13	3245	218	2826	122
Лат. 14	3013	124	2480	161
Нерж. 31	6140	318	3733	285
Нерж. 33	6140	209	3924	94

Сталь 41	6094	584	4791	351
Сталь 44	4847	94	4015	201

Испытание микротвердости методом вдавливания производилось на приборе ПМТ-3 и стандартизовано (ГОСТ 9450-60). В качестве индентора при измерении микротвердости использовалась правильная четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136^0. Эта пирамида плавно вдавливается в образец при нагрузке от 2 до 200 г. Число микротвердости H определяется по формуле:

$$H = 1854 \cdot \frac{P}{d^2}\left[\frac{H}{м^2}\right],$$

где P – нагрузка, в H;

d – диагональ отпечатка, в $м$;

Метод используется для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка. Главное его назначение – оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разницы в твердости разных участков этих составляющих.

Микротвердость измеряют на металлографических шлифах, приготовленных специальным образом. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости $d/7$ – составляет несколько микрон и соизмерима с глубиной получаемого в результате механической шлифовки и полировки наклепанного поверхностного слоя. Поэтому очень важно правильно подготовить поверхностный слой образца. Все поверхностные дефекты (окалина, выбоины, вмятины, грубые риски) должны быть удалены. При измерении микротвердости расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее двух длин диагонали большого отпечатка. Таким же должно быть расстояние от центра отпечатка до края образца. Длина диагонали отпечатка должна быть не более полуторной толщины образца.

4. Среди механических свойств нанокластеров и наноструктур необходимо отметить высокую твердость и высокую пластичность. Прежде всего, твердость наноструктуры должна возрастать с уменьшением размера кластера.

С другой стороны, при нанометровом размере большое значение имеет диффузионное скольжение нанокристаллитов, и скорость деформации значительно возрастает. Таким образом, прочностные свойства наноматериала определяются соотношением между пределом текучести (прочностью) и скоростью деформации. Еще одним фактором увеличения скорости деформации следует считать возрастание коэффициента диффузии при уменьшении размера кластера. Классические технологии ультразвуковой обработки материалов позволяют получать поверхностные и приповерхностные наноструктуры, но только авторезонансные технологии могут обеспечить стабильность структурированности и заданные свойства поверхности после обработки, получение нанокристаллических структур с определенными параметрами. Получение при авторезонансном ультразвуковом резании стали, меди или латуни специфических высокоэффективных, с точки зрения физико-механических свойств нанокристаллических структур указывает на важность изучения и развития метода ультразвукового резания и выглаживания материалов.

5. Вопрос о построении теоретических моделей рассмотренных здесь явлений, вообще говоря, представляет собой совершенно самостоятельную проблему. В качестве примера одной из возможных моделей можно рассмотреть двумерную механическую модель конструкции решетчатого типа, показанную на рис 4 (ср. рис. 1, г). Рассмотрим прямоугольную решетку [9], составленную из двух взаимно перпендикулярных семейств упругих одинаковых линейных струн, защемленных на концах и имеющих соответственно

длины L_1 и L_2 (рис 4). Каждая струна нумеруется при помощи индексов k = 0,1,2,., N_1 и q = 0,1,2.. N_2. В вершинах решетки помещены точечные твердые тела с одинаковыми массами m.

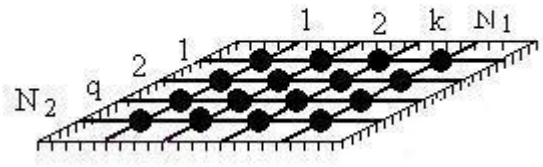


Рис.4.

Предполагается, что прямоугольные ячейки решетки одинаковы, но длины и ширины их сторон, вообще говоря, не равны между собой и сама решетка (дискретный аналог мембраны) - анизотропная. Струнные элементы предполагаются безынерционными. Крепления струн в узлах считаются абсолютно жесткими, а их натяжения - настолько большими, что возможными изменениями при линейных колебаниях можно пренебречь.

Пусть каждая «горизонтальная сторона» ячеек имеет длину ΔL_1; «вертикальная» - ΔL_2 . Кроме того, пусть безынерционные «горизонтальные участки» имеют натяжение T_1 , а «вертикальные участки» - соответственно T_2. Таким образом, динамика решетчатой конструкции может быть описана посредством функций смещения узлов решетки $u_{kq}(t)$, где индексы k=0,1,2,.. N_1; q=0,1,2,.. N_2. При этом каждая из функций $u_{kq}(t)$ изменяется вдоль некоторой оси, перпендикулярной плоскости статического равновесия решетки. Будем считать, что первый по счету индекс (в данном случае k – нумерует струну, расположенную «слева направо» или наоборот), а второй индекс (в данном случае q – «снизу вверх» или наоборот).

Пусть силы диссипации, вынуждающие силы, а также любые другие неконсервативные силы, действующие в решетке на каждое из массивных точечных тел – малы. Обозначив их $\varepsilon g_{kq}(t, u_{kq}, \dot{u}_{kq},\ldots)$, где многоточие обозначает прочие неучитывыемые сейчас переменные, ε - малый параметр, модель системы построим следующим образом. Так как каждая частица лежит одновременно на двух струнах, то для всех значений индексов имеем N уравнений:

$$m\ddot{u}_{kq}+c_1(2u_{kq}-u_{(k-1,q)}- u_{(k+1,q)})+c_2(2u_{kq}-u_{(k,q-1)}- u_{(k,q+1)})= \varepsilon g_{kq}(t, u_{kq}, \dot{u}_{kq},\ldots). \qquad (1)$$

Здесь соответственно обозначено: $c_{1,2} = T_{1,2}/\Delta L_{1,2}$ – коэффициенты упругости. Граничные условия защемления можно записать как (ср. [9-11]) $u_{kq}=0$, при $k=0;N_1$; $q=0;N_2$. Поэтому $N= (N_1 -1)(N_2-1)$.

При необходимости сюда могут быть добавлены начальные условия. Однако далее рассматриваются установившиеся режимы движения. И поэтому вид начальных условий - несущественен.

6. Приведем операторные уравнения движения, следующие из уравнений (1). В соответствии с общими методиками [10,11] построим сначала оператор динамической податливости $\hat{L}(p)=||L_{kq,nj}(p)||$; $p \equiv d/dt$,

В данном случае выражение $L_{kq,nj}(p)$ обозначает проходной оператор динамической податливости [11], ставящей в соответствие силе, приложенной в узле (n, j) перемещение узла (k, q). И, соответственно, при n=k, j=q – имеем локальные операторы динамической податливости [11], отвечающие перемещению узла, вследствие силы, приложенной в нем

самом. Для рассматриваемой системы принцип взаимности записывается как $L_{kq,nj}(p) = L_{nj,kq}(p)$.

Отметим, что четырехиндексная нумерация компонент системы операторов динамической податливости $L_{kq,nj}(p)$ вызвана тем обстоятельством, что каждый узел нумеруется парой индексов. В принципе имеется возможность «спрямить» нумерацию и каждому узлу присвоить единственный номер. Это, однако, породит формальные сложности.

Система уравнений движения (1) при этом разрешается в виде

$$||u_{kq}|| = \varepsilon \hat{L}(p)||g_{nj}||,.$$

где $\varepsilon||g_{kq}||$ - матрица внешних сил, приложенных в узлах решетки.. что покомпонентно записывается так:

$$u_{kq}(t) = u_{kq}(t) = \varepsilon \sum \sum L_{kq,nj}(p) g_{nj}(t). \qquad (2)$$

Причем суммирование ведетмся по n и по j. Соответствующие построения можно провести и для многокомпонентного оператора динамической жесткости $\hat{L}^{-1}(p)$ [11, 12].

Отметим, что при таком выборе модели, даже линейные силы демпфирования относятся к внешним воздействиям. При выборе популярных линейных моделей диссипации, силы демпфирования могут быть учтены в самой структуре оператора $\hat{L}(p)$ [11-13]. (см. п.4).

Выражения для операторов динамических податливостей полностью определяются наборами собственных частот $\{\Omega_{kq}\}$ и нормированных коэффициентов собственных форм $\{\Theta_{kq}\}$ линейной системы [10,11].

Используя результаты, данные в монографии [1] для решетки рассматриваемого типа:

$$\Omega^2_{kq} = \frac{2T_1}{m\Delta L_1}[1-\cos(k\pi N_1^{-1})] + \frac{2T_2}{m\Delta L_2}[1-\cos(q\pi N_2^{-1})] \qquad (3)$$

$$\Theta_{kq} = C\sin(kn\pi N_1^{-1})\sin(qj\pi N_2^{-1}), \qquad (4)$$

где C=const. При этом в силу выбранных граничных условий n = 1,2,… N_1-1 и также j = 1,2,… N_2-1. В соответствии с общими методами построения операторов динамической податливости [10,11] теперь можно получить для компонентов оператора $\hat{L}(p)$, определяющих (2):

$$L_{kq,nj}(p) = \zeta \sum_{\alpha=1}^{N_1-1} \sum_{\beta=1}^{N_2-1} \sin(k\alpha\pi N_1^{-1})\sin(q\beta\pi N_2^{-1})\sin(\alpha n\pi N_1^{-1})\sin(\beta j\pi N_2^{-1})(\Omega^2_{\alpha\beta} + p^2)^{-1}. \qquad (5)$$

Здесь введен нормировочный коэффициент : ζ, который, в общих случаях удобнее всего вычислять при конкретно заданных параметрах системы. В данном случае можно положить: $\zeta = 2[(N_1-1)(N_2-1)]^{-2}$.

Операторы динамической податливости полностью определяются линейными частями систем. При их посредстве задача об определении поведения искомых функций либо дается формулой (2), либо нелинейного операторного уравнения типа

$$u_{kq}(t) = u_{kq}(t) = \varepsilon \sum \sum L_{kq,nj}(p) g_{nj}(p; u_{kq}(t); u_{kq}(t); t),. \qquad (6)$$

в случае, когда силы возбуждения каким-либо образом зависят от координат. Эти проблемы будут рассмотрены в последующих работах. Заметим также, что предлагаемый подход может быть использован при послойном рассмотрении системы, когда могут быть использованы модели типа стопок [13] (рис.5).

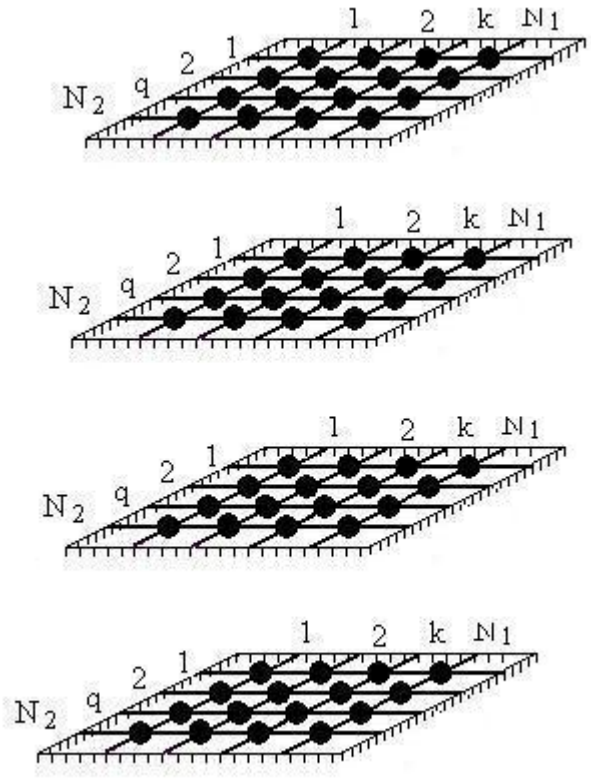


Рис.5.

На рис. 5. Решетчатые слои показаны в виде стопки. Взаимодействие между ними осуществляется через микросоударения. Возможны и другие модели таких взаимодействий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 09-08-00941-а, 10-8-00500-а).

Литература.

1. Гусев А.И., Рempель А.А. Нанокристаллические материалы. М., Физматлит, 2000. 223 с.
2. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
3.Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И. и др**.** Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 4. – С. 73–84.
4.Клименов В.А., Ковалевска Ж.Г., Уваркин П.В. и др**.** Ультразвуковое модифицирование поверхности и его влияние на свойства покрытий. // Физическая мезомеханика. 2004. –Т. 7. Специальный выпуск, ч. 2. – С. 157-160.
5. Асташев В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания. – Проблемы машиностроения и надежности машин, 1992, №3, с.81-86.
6.Асташев В.К., Крупенин В.Л. Инновационные авторезонасные вибротехнологии // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 7. С. 84—85. 12.Крупенин В.Л., Колик Л.В. Об авторезонансных нанотехнологиях // Современные наукоемкие технологии. 2009. № 4. С. 63—64.
7. Крупенин В.Л., Асташев В.К., Андрианов Н.А., Козочкин М.П., Колик Л.В., Солис-Пинарготе Н.В.. К реализации авторезонансной ультразвуковой технологии. \\ Проблемы машиностроения и надежности машин, № 6, 2009 г. – С.

8. В.К. Асташев, Н.А. Андрианов, Л.В. Колик, В.Л. Крупенин. Авторезонансная ультразвуковая технология резания \\Интернет – журнал. Вестник научно-технического развития, № 1 (29), 2010 г.С.3 - 10
9.Нагаев Р.Ф., Ходжаев К.Ш. Колебания механических систем с периодической структурой. - Ташкент: ФАН, 1973. – 272 с.
10. Бабицкий В.И., Крупенин В.Л. Колебания в сильно нелинейных системах.-М., Наука, 1985. – 384 с.
11.Babitsky V.I.,. Krupenin V.L Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems.- Berlin. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001. –404 p.p.
12. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами
13. В.Л. Крупенин. К анализу динамики колеблющейся двумерной решетки\\Интернет – журнал. Вестник научно-технического развития, № 2 , 2007 г.С.8 - 18

Поступила: 4.10.10.