

Экспериментальные точки на рис. 4 для составов $Pb_{0.96}Sn_{0.2-z}Ge_zNa_{0.01}Pb_{0.01}S$ в области $N_{Ge} < N_{Sn}$ ложатся на теоретическую кривую, проведенную для $n = 2$. Это свидетельствует о том, что в PbS изоэлектронная примесь германия является двухэлектронным донором, а энергетические уровни германия лежат выше уровней олова. Экспериментальные точки на рис. 4 для составов $Pb_{0.96}Sn_{0.2-z}Ge_zNa_{0.01}Pb_{0.01}Se$ в области $N_{Ge} < N_{Sn}$ ложатся на кривую (она проведена пунктиром), проходящую вблизи теоретической кривой, проведенной для $n = 2$. Это также свидетельствует о том, что в PbSe изоэлектронная примесь германия является двухэлектронным донором, а энергетические уровни германия лежат выше уровней олова. Отличие экспериментальной и теоретической зависимостей является следстви-

ем влияния дырок на концентрацию ионизованных центров олова.

Таким образом, показано, что зарядовое состояние антиструктурного дефекта Ge не зависит от положения уровня Ферми, тогда как в катионной подрешетке PbX центр Ge представляет собой электрически активную примесь: в электронных образцах мессбауэровский спектр отвечает нейтральному состоянию донорного центра, а в дырочных образцах – двукратно ионизованному состоянию этого центра. Для частично компенсированных образцов PbSe обнаружен электронный обмен между нейтральными и ионизованными донорными центрами. Продемонстрировано, что энергетические уровни германия лежат выше уровней, образуемых примесными атомами олова в PbX.

Литература

1. Anisimova N.A., Bordovsky G.A., Bordovsky V.A., Castro R.A. Defect influence on charge transport in chalcogenide glasses // Radiation Effects and Defects in Solids. Vol. 156.
2. Немов С.А., Серегин П.П., Кожанова Ю.В., Серегин Н.П. Двухэлектронные центры олова, образующиеся в халькогенидах свинца в результате ядерных превращений // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 12.
3. Seregin N.P., Seregin P.P., Nemov S.A., Yanvareva A.Yu. Antistructural defects in lead chalcogenides // J. Phys.: Condens.Matter. 2003. Vol. 15.
4. Немов С.А., Серегин П.П., Иркаев С.М., Серегин Н.П. Положение примесных атомов мышьяка в решетке PbTe // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 3.

УДК 539.37

Т.В. Новикова, С.Н. Колупаева**, В.А. Старенченко***

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГЦК-МЕТАЛЛОВ

* Томский государственный педагогический университет

** Томский государственный архитектурно-строительный университет

Математические модели пластической деформации, в основе которых лежат уравнения баланса деформационных дефектов, являются эффективным инструментом описания процессов пластичности и структурообразования в кристаллических материалах [1–11]. Для исследования процессов формирования и эволюции разориентированной дефектной субструктур в ГЦК-монокристаллах в работах [9, 10] была предложена математическая модель, включающая уравнения баланса дислокаций и дислокационных стенок. Уравнения модели записаны на основе рассмотрения механизмов и процессов дефектообразования при формировании зон кристаллографического сдвига.

В работах [9–11] показано, что для ГЦК-металлов возможно динамическое возникновение зародышей дислокационных стенок в результате взаимодействия движущихся дислокаций с точечными дефектами. Рассмотрены также возможные варианты развития дефектной подсистемы, состоящей из дислокаций и дислокационных стенок, проведено качественное сравнение найденных тенденций развития дефектной

структуры со структурой, наблюдаемой при деформировании ГЦК-материалов.

В настоящей работе представлены результаты исследования на основе модели, включающей уравнения баланса дислокаций и дислокационных стенок [9, 10], возможного изменения структуры фазового пространства модели при изменении значений параметров модели (которые определяются характеристиками деформируемого материала и условиями нагружения).

Определим условия, при выполнении которых возможно динамическое образование зародышей дислокационных стенок [9, 10]. Формирование зародыша дислокационной стенки происходит, когда движущаяся дислокация под действием избыточного напряжения τ_{dyn} [7, 8] приобретет кинетическую энергию, достаточную для преодоления энергетического барьера, возникающего при взаимодействии краевой дислокации с дислокациями, образующими стенку, и достаточно высока концентрация точечных дефектов. Избыточное напряжение для квазистатических усло-

вий деформирования может быть представлено в виде $\tau_{dyn} = \alpha_{dyn} Gbp^{1/2}$ [7, 8], где α_{dyn} – безразмерный параметр; ρ – плотность дислокаций, определяемая как общая длина дислокаций в единице объема; G – модуль сдвига. Динамическое формирование зародышей дислокационных стенок на границе зоны сдвига происходит при выполнении условия [9, 10]:

$$\alpha_{dyn} > \frac{n\rho^{-1/2}}{\pi D(1-\nu)} \ln \frac{D}{3hn}, \quad (1)$$

где n – число дислокаций в стенке, ν – коэффициент Пуассона, D – диаметр зоны сдвига. Для широкого спектра условий деформирования диаметр зоны сдвига определяется соотношением [5, 6] $D = B\tau/(Gbp)$, где B – вычисляемый параметр, характеризующий вероятность формирования протяженных барьеров, ограничивающих зону сдвига; τ – напряжение сдвига; b – модуль вектора Бюргерса. Расстояние между дислокациями стенки h определяется соотношением [9, 10] $h = p_i \xi \rho D^2 b / [8(n+1)]$, где p_i – вероятность образования порога при пересечении скользящей дислокацией дислокации леса, ξ – доля дислокаций леса.

Бездиффузионная модель дефектной среды, состоящей из дислокаций и дислокационных стенок, для ГЦК-монокристаллов имеет вид [9–11]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN}{da} &= h \frac{GF\rho}{B\tau} (1-\omega) - K_\tau N, \\ \frac{d\rho}{da} &= \frac{GF\rho}{B\tau} (\omega - A_p), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN}{da} &= h \frac{GF\rho}{B\tau} (1-\omega) - K_\tau N, \\ \frac{d\rho}{da} &= \frac{GF\rho}{B\tau} (\omega - A_p), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где

$$\omega = \begin{cases} \omega_s, & \text{если } \alpha_{dyn} > \frac{n\rho^{-1/2}}{\pi D(1-\nu)} \ln \frac{D}{3hn}, \\ 1, & \text{если } \alpha_{dyn} < \frac{n\rho^{-1/2}}{\pi D(1-\nu)} \ln \frac{D}{3hn}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь N – плотность стенок, определяемая как общая их площадь в единице объема; a – степень деформации; F – вычисляемый параметр, характеризующий геометрическую конфигурацию зоны сдвига [5, 6]; ω_s – доля винтовых дислокаций; K_τ – константа, характеризующая интенсивность силового разрушения стенок [12].

В уравнении баланса дислокационных стенок (2) первое слагаемое описывает интенсивность динамической генерации стенок в процессе деформации при условии, что все вновь образованные невинтовые дислокации перестраиваются в стенки [9, 10]. Необходимо учитывать при этом, что динамическое формирование стенок происходит лишь при выполнении условия (1). Второе слагаемое – скорость распада стенок силовым путем под действием приложенного напряжения.

В уравнении баланса дислокаций (3) первое слагаемое – скорость генерации дислокаций, второе – скорость аннигиляции винтовых дислокаций поперечным скольжением. Параметр аннигиляции имеет вид

$A = 1/(48\pi (\omega_s Gb/\tau_f)^2)$ [5, 6, 14], где τ_f – напряжение трения. Для напряжения сдвига используем зависимость вида $\tau = \tau_f + \alpha Gbp^{1/2}$, где α – параметр междислокационных взаимодействий.

Система уравнений (2) – (4) с учетом выражений для D , h , τ и A имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN}{da} &= \frac{FBp_j \xi}{8(n+1)Gb} (1-\omega)(\tau_f + aGbp^{1/2}) - K_\tau N, \\ \frac{d\rho}{da} &= \frac{GF\rho}{B(\tau_f + aGbp^{1/2})} \left(\omega - \frac{1}{48\pi} \left(\frac{\omega_s Gb}{\tau_f} \right)^2 \rho \right), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где

$$\omega = \begin{cases} \omega_s, & \text{если } \alpha_{dyn} > \alpha_0, \\ 1, & \text{если } \alpha_{dyn} < \alpha_0, \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{nGbp^{-1/2}}{\pi(1-\nu)B(\tau_f + aGbp^{1/2})} \ln \left[\frac{8(n+1)G}{3np_j \xi (\tau_f + aGbp^{1/2})} \right].$$

Система уравнений (5) является системой обыкновенных дифференциальных уравнений с кусочно-сплошной правой частью, т.е. в процессе эволюции системы может происходить ее переключение в зависимости от выполнения условия (1). Условие (1) будем называть условием переключения системы (5).

С использованием методов качественного анализа динамических систем было проведено исследование возможных сценариев развития дефектной подсистемы, описываемой уравнениями (5) – (6).

Для случая $\omega = 1$ (т.е. когда невозможно динамическое формирование дислокационных стенок) система уравнений (5) – (6) имеет две стационарные точки [11]:

$$\begin{aligned} 1) N_1^s &= 0, \quad \rho_1^s = 0, \\ 2) N_2^s &= 0, \quad \rho_1^s = 48\pi(\tau_f / \omega_s Gb). \end{aligned} \quad (7)$$

Для альтернативного случая, когда возможно динамическое формирование дислокационных стенок, т.е. при $\omega = \omega_s$, система уравнений (5) – (6) также имеет две стационарные точки [11]:

$$\begin{aligned} 1) N_3^s &= \frac{FBp_j \xi \tau_f}{8(n+1)GbK_\tau} (1-\omega_s), \quad \rho_3^s = 0; \\ 2) N_4^s &= \frac{FBp_j \xi \tau_f}{8(n+1)GbK_\tau} (1-\omega_s) \left(1 + a \sqrt{\frac{48\pi}{\omega_s}} \right), \\ \rho_4^s &= \frac{48\pi}{\omega_s} \left(\frac{\tau_f}{Gb} \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

В обоих случаях первая точка является седлом, вторая точка – устойчивым узлом. Стационарная точка типа «седло» лежит в области физически нереализуемых значений плотности дислокаций и дислокационных стенок. Поэтому рассмотрим поведение дефектной подсистемы в окрестности стационарной точ-

ки типа «узел», которая соответствует физически реальным значениям параметров и переменных модели. Стационарную точку системы уравнений (5) – (6), имеющую координаты (N_2^s, ρ_2^s) , определяемые по формулам (7), ($\omega = 1$ и дислокационные стенки не формируются) обозначим S_1 . Стационарную точку системы уравнений (5) – (6), имеющую координаты (N_4^s, ρ_4^s) , определяемые по формулам (8), ($\omega = \omega_s$ и формирование дислокационных стенок происходит) обозначим S_2 .

Для условия переключения (1) системы уравнений (5) возможны следующие ситуации в зависимости от значений параметров модели: 1) ни одной границы сшивания; 2) одна граница сшивания; 3) две границы сшивания системы уравнений (5) по плотности дислокаций ρ . Наиболее интересный случай, когда существуют две границы сшивания (рис. 1).

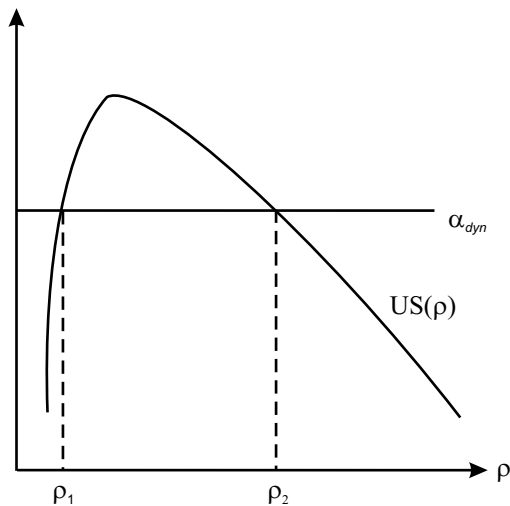


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая условие формирования зародышей дислокационных стенок (1). Функция $US(\rho)$ есть правая часть условия переключения (1), α_{dyn} – левая часть, ρ_1, ρ_2 – границы сшивания системы (5) – (6)

В зависимости от взаимного расположения стационарных точек и границ сшивания системы уравнений (5) – (6) возникают различные сценарии поведения дефектной подсистемы при физически реализуемых значениях параметров модели для никеля (рис. 2, а – е).

На рис. 2, а – в наблюдается развитие дефектной подсистемы в направлении некоторого стационарного состояния, характеризующегося ненулевыми значениями плотностей дислокаций и дислокационных стенок независимо от исходного состояния. При этом на линиях $\rho = \rho_1$ и $\rho = \rho_2$ будет происходить излом фазовых траекторий.

На рис. 2, г наблюдается выход на одно из двух стационарных состояний в зависимости от начальных условий. Если начальная плотность дислокаций $\rho > \rho_1$,

то происходит разрушение дислокационных стенок и состояние дефектной подсистемы характеризуется некоторым ненулевым значением плотности дислокаций и нулевым значением плотности дислокационных стенок. Если же начальная плотность дислокаций $\rho < \rho_1$, то дефектная подсистема приходит к некоторому стационарному состоянию с ненулевыми значениями плотности дислокаций и дислокационных стенок.

Фазовые портреты (рис. 2, д) характеризуются тем, что развитие дефектной подсистемы идет в направлении двух стационарных состояний, но эти стационарные состояния не достигаются, так как стационарные значения плотности дислокаций лежат по другую сторону границ сшивания. Таким образом, дефектная подсистема как бы «стабилизируется» при достижении плотности дислокаций $\rho = \rho_2$ независимо от начальных условий и достигнутой плотности дислокационных стенок.

В случае, представленном на рис. 2, е развитие дефектной подсистемы может идти двумя путями в зависимости от начальных условий. Если начальная плотность дислокаций $\rho < \rho_1$, то дефектная подсистема приходит к некоторому стационарному состоянию с ненулевыми значениями плотности дислокаций и дислокационных стенок. Если начальная плотность дислокаций $\rho > \rho_1$, то дефектная подсистема «стабилизируется» при достижении плотности дислокаций $\rho = \rho_2$ независимо от достигнутой плотности дислокационных стенок.

Фазовые портреты для случая, когда не существует границы сшивания или существует одна граница сшивания, аналогичны рис. 2, а.

Таким образом, в области физически реализуемых условий характер формирования деформационных структур может быть весьма разнообразным. Возможны 6 различных сценариев развития дефектной подсистемы, состоящей из дислокаций и дислокационных стенок. Экспериментально наблюдались следующие сценарии развития дефектной субструктуры: 1) достижение стационарной плотности дислокаций без образования дислокационных стенок [13]; 2) достижение стационарного состояния, когда плотности дислокаций и дислокационных стенок сохраняют постоянные значения [14].

Исследование системы дифференциальных уравнений (5) – (6) проведено для значений параметров модели, характерных для меди и никеля. В данной работе представлены результаты исследования, проведенного для никеля. Базовые значения и интервалы варьирования параметров приведены в табл. 1. Выбранные значения модуля сдвига соответствуют температуре 300 К. На рис. 3–6 область I соответствует рис. 2, а, область II – рис. 2, в, область III – рис. 2, д. Между собой области I, II и III разделены штрихпунктирными линиями (рис. 3–5).

По характеру влияния изменения значения параметра на стационарную плотность дислокаций и по-

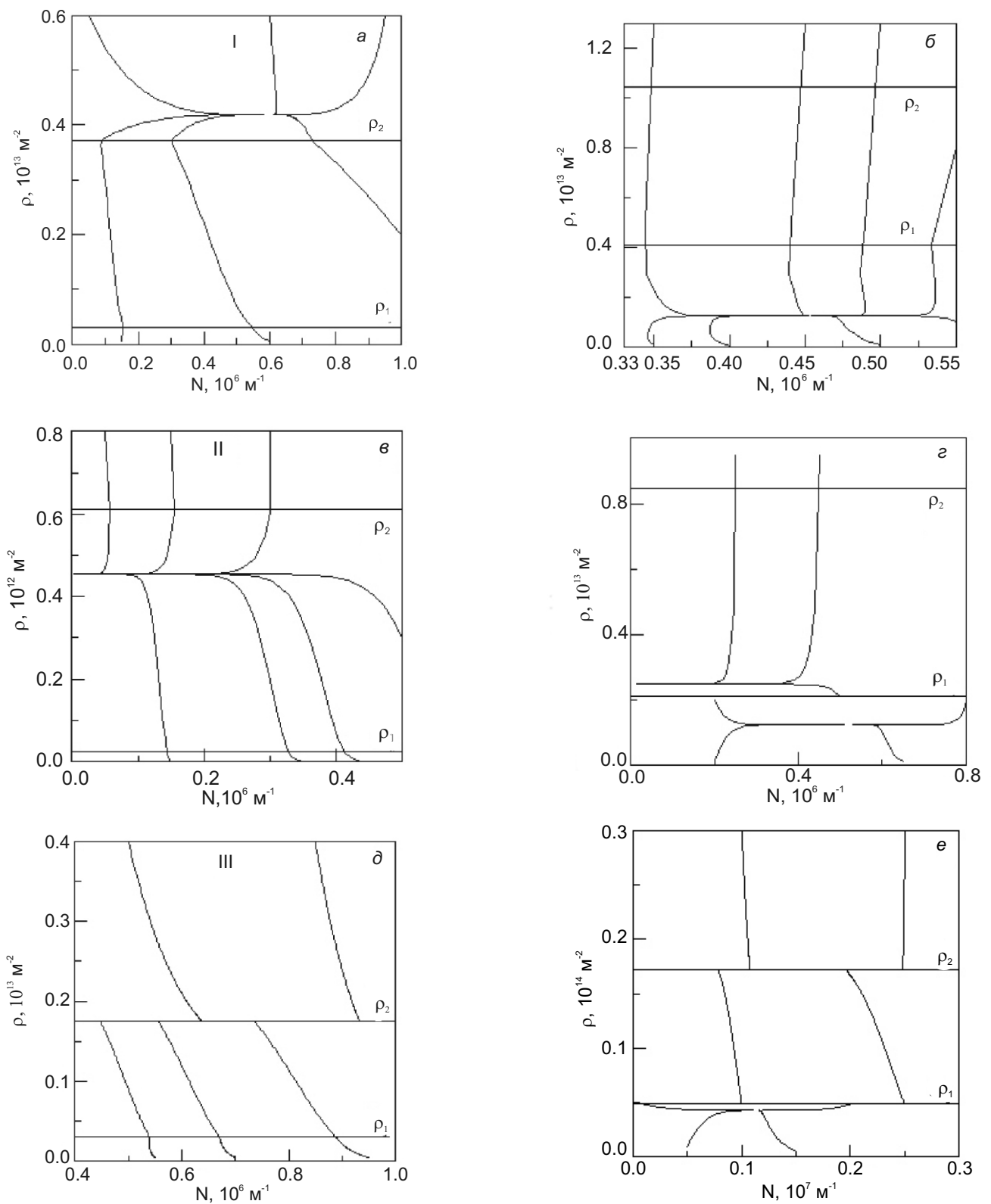


Рис. 2. Фазовые портреты системы уравнений (5) – (6) при $\xi = 0.5$ (а–е); $\tau_f = 3 \cdot 10^6$ Н/м² (в), $5 \cdot 10^6$ Н/м² (б, г, д, е), 10^7 Н/м² (а); $\eta = 50$ (а, б, г, д, е), 100 (в); $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м² (а, е), $9.88 \cdot 10^{10}$ Н/м² (б, г, д, е); $\alpha = 0.1$ (б, е), 0.125 (г), 0.3 (д), 0.5 (а, б); $\omega_s = 0.22$ (е), 0.5 (б, г, д), 0.7 (в), 0.9 (а); $\alpha_{dyn} = 0.14$ (а), 0.31 (д), 0.4 (в), 0.75 (г), 0.89 (е), 0.945 (б); $B = 800$ (а–е); $F = 10$ (а–е); $K_f = 3$ (а–е) и координаты стационарных точек: а – S1 (0, $4.654 \cdot 10^{13}$), S2 ($6.105 \cdot 10^5$, $4.189 \cdot 10^{13}$); б – S1 (0, $2.472 \cdot 10^{13}$), S2 ($4.526 \cdot 10^5$, $1.236 \cdot 10^{13}$); в – S1 (0, $4.54 \cdot 10^{12}$), S2 ($2.507 \cdot 10^5$, $3.178 \cdot 10^{12}$); г – S1 (0, $2.472 \cdot 10^{13}$), S2 ($5.244 \cdot 10^5$, $1.236 \cdot 10^{13}$); д – S1 (0, $2.472 \cdot 10^{13}$), S2 ($1.027 \cdot 10^6$, $1.236 \cdot 10^{13}$); е – S1 (0, $1.947 \cdot 10^{14}$), S2 ($1.53 \cdot 10^6$, $4.283 \cdot 10^{13}$) для никеля

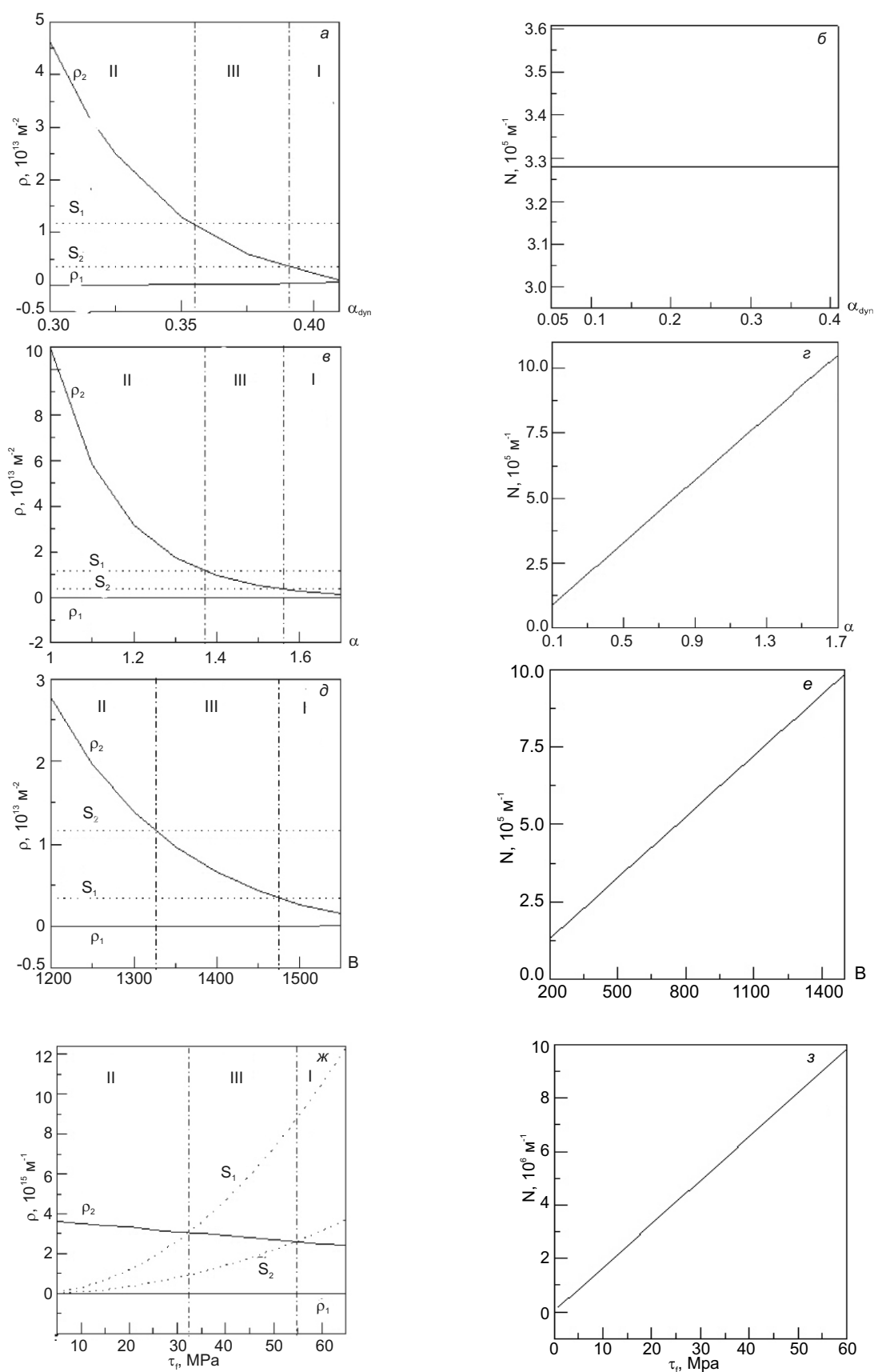


Рис. 3. Значения стационарных плотностей дислокаций, положения границ сшивания (а, в, д, ж) и стационарной плотности дислокационных стенок (б, г, е, з) в зависимости от изменения параметров α_{dyn} (а, б), α (в, г), B (д, е), τ_r (ж, з) для никеля

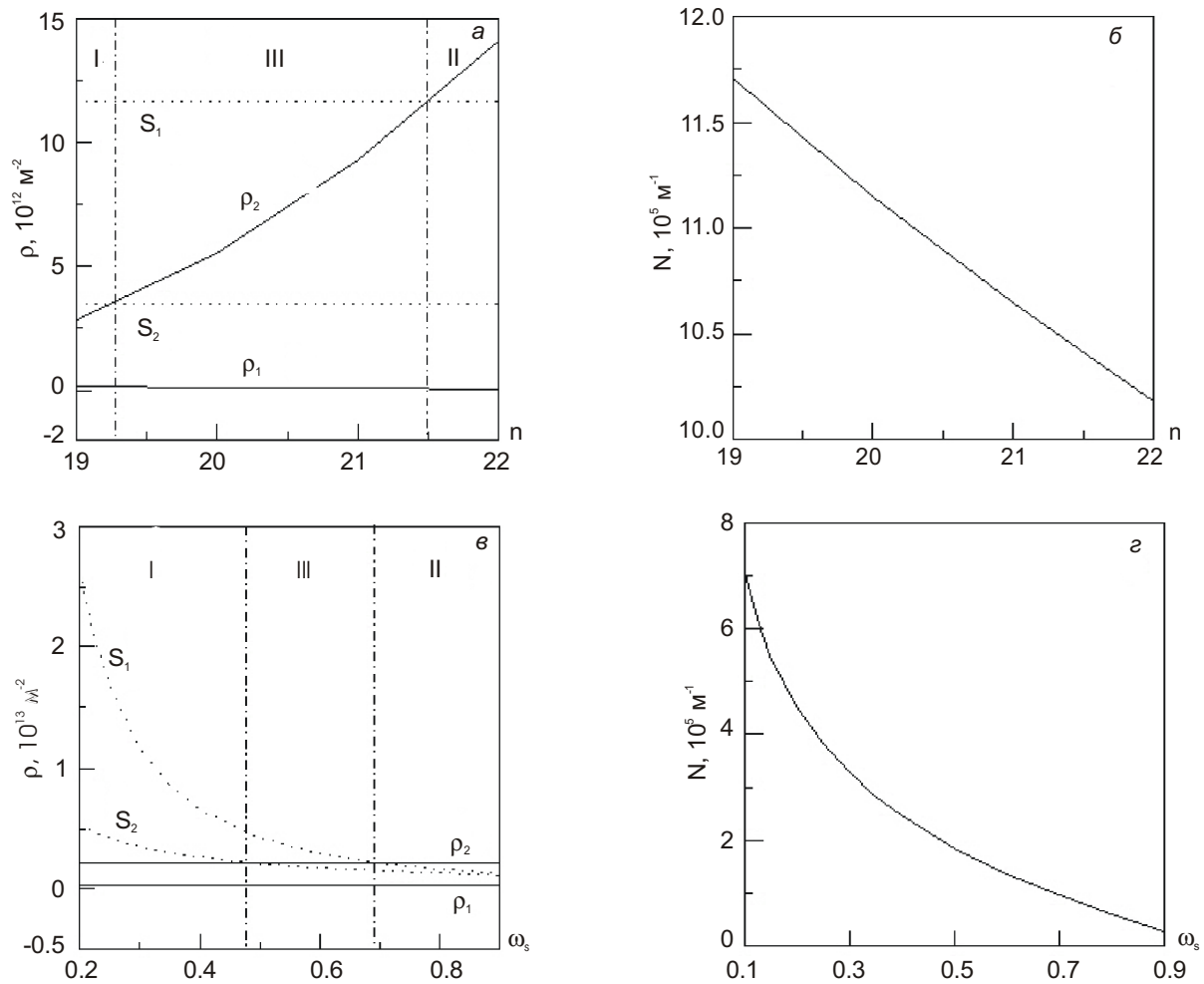


Рис. 4. Значения стационарных плотностей дислокаций, положения границ сшивания (а, в) и стационарной плотности дислокационных стенок (б, г) в зависимости от значений параметров n (а, б), ω_s (в, г) для никеля; (а, б – $V = 700$, в, г – $\alpha_{\text{dyn}} = 0.4$)

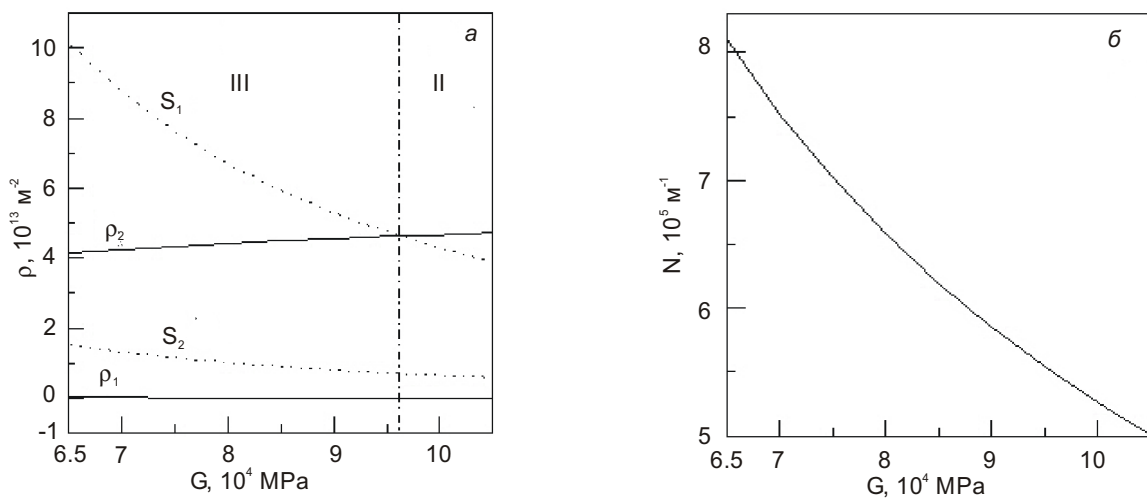


Рис. 5. Значения стационарных плотностей дислокаций, положения границ сшивания (а) и стационарной плотности дислокационных стенок (б) в зависимости от значений параметра G для никеля ($\alpha_{\text{dyn}} = 0.3$, $\omega_s = 0.15$)

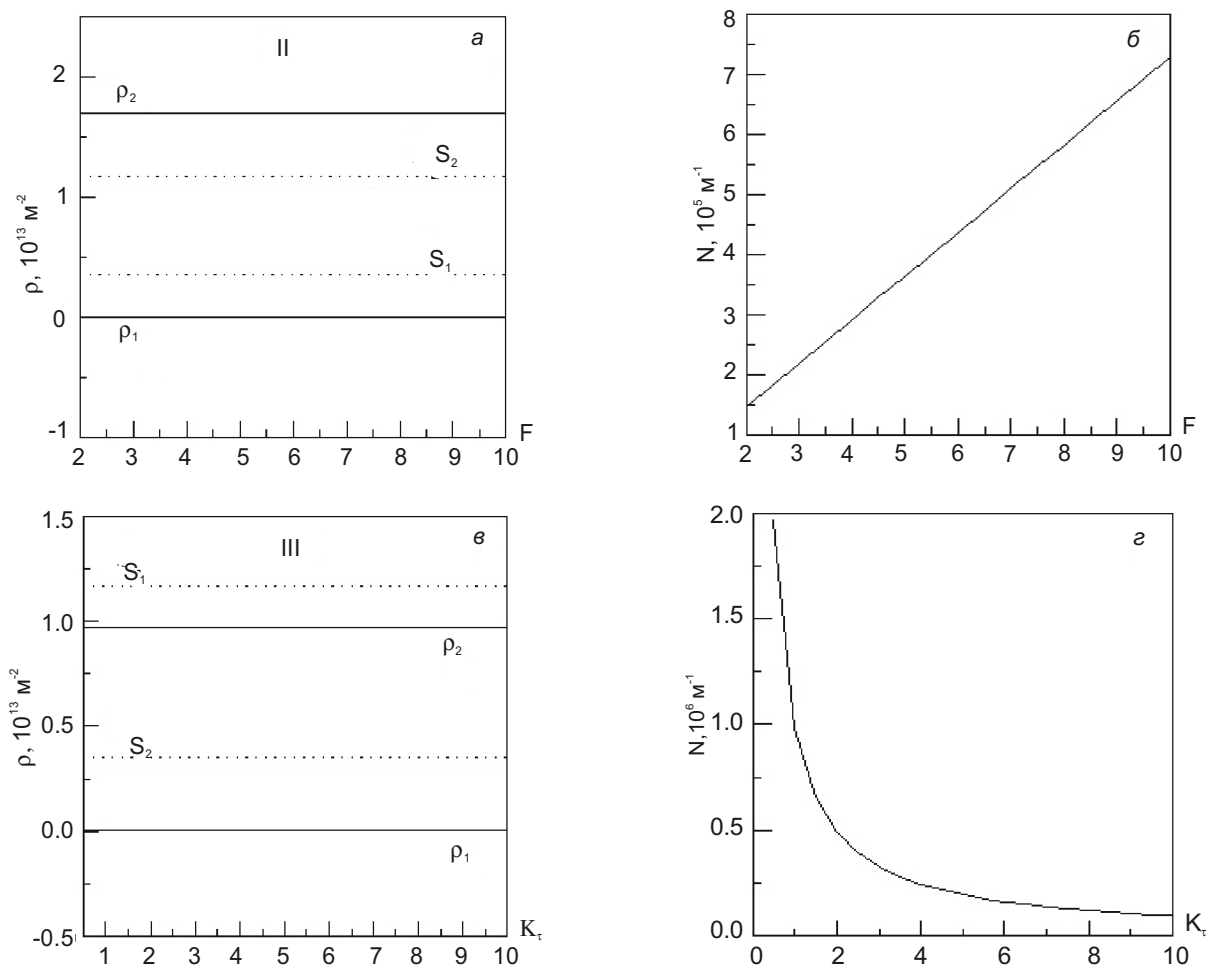


Рис. 6. Значения стационарных плотностей дислокаций, положения границ сшивания (а, в) и стационарной плотности дислокационных стенок (б, г) в зависимости от значений параметров F (а, б) и K_{τ} (в, г) для никеля ($a, б - \alpha_{dyn} = 0.34$; в, г - $\alpha_{dyn} = 0.36$)

Параметры модели

Параметр	Физический смысл	Базовое значение	Интервал варьирования, источник
n	Число дислокаций в стенке	50	12–100
B	Параметр, характеризующий вероятность формирования протяженных барьеров, ограничивающих зону сдвига	500	200–1500 [6, 7]
G	Модуль сдвига	$9.58 \cdot 10^4$ МПа	$6.5 \cdot 10^4 - 10.5 \cdot 10^4$ МПа
τ_f	Напряжение трения	2 МПа	1–35 МПа
α	Параметр, характеризующий интенсивность междислокационных взаимодействий	0.5	0.1–1.7
α_{dyn}	Параметр, характеризующий избыточное напряжение	0.1	0.05 – 0.45 [8, 9]
F	Параметр, характеризующий геометрическую конфигурацию зоны сдвига	4.5	2 – 7.5 [6, 7]
K_{τ}	Константа, характеризующая интенсивность силового разрушения стенок	3	0.5 – 10 [10]
ω_S	Доля винтовых дислокаций	0.3	0.01–0.99

ложение границ сшивания параметры модели можно условно разделить на три группы.

К первой группе относятся параметры α_{dyn} , α , B , τ_p (табл. 1), для которых на интервале варьирования наблюдаются два пороговых значения (на рисунках пороговые значения отмечены штрихпунктирными линиями), после преодоления которых меняется сценарий поведения деформационной дефектной подсистемы (рис. 3, 4). Для параметров этой группы с изменением их значений (ростом или уменьшением) дважды наблюдается изменение структуры фазового пространства, т.е. имеют место три различных сценария поведения фазовых траекторий системы уравнений (5) – (6). Эту группу параметров можно разделить еще на две подгруппы. Для первой подгруппы параметров (α_{dyn} , α , B , τ_p) изменение сценариев поведения деформационной дефектной подсистемы (рис. 3) при возрастании значения параметра происходит в направлении $\text{II} \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{I}$; т.е. при малых значениях параметров развитие дефектной подсистемы определяется разрушением дислокационных стенок, независимо от их исходной плотности, и выходом на некоторую стационарную плотность дислокаций (область II). При значениях параметров выше первой пороговой величины развитие дефектной подсистемы идет в направлении стационарного состояния, характерного для кусочно-сшитых систем, т.е. независимо от начальных условий, плотность дислокаций стремится к значению $\rho = \rho_2$, которое достигается при различных значениях плотности дислокационных стенок N (область III). И, наконец, при больших значениях параметров развитие дефектной подсистемы идет в направлении некоторого стационарного состояния, характеризующегося ненулевыми значениями плотности дислокаций и плотности дислокационных стенок независимо от их начальных значений (область I). Отметим, что стационарная плотность дислокационных стенок при росте значения параметра α_{dyn} (рис. 3, б) остается неизменной, при росте значений параметров α , B , τ_p (рис. 3, з, е, з) повышается. Для второй подгруппы параметров n , ω_s изменение сценариев поведения деформационной дефектной подсистемы при возрастании значения параметра происходит в обратном направлении $\text{I} \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{II}$ (рис. 4). При росте значений параметров n , ω_s происходит снижение стационарной плотности дислокационных стенок (рис. 4, в, з).

Ко второй группе относится параметр G – модуль сдвига, для которого на интервале варьирования

наблюдается одно пороговое значение. И имеют место два различных сценария поведения дефектной подсистемы. Если рассматривать процесс при повышении температуры, это будет соответствовать уменьшению параметра G . С этой точки зрения, смена сценариев поведения дефектной подсистемы происходит в направлении $\text{II} \rightarrow \text{III}$; т.е. с уменьшением значения параметра G (с ростом температуры) становится возможным динамическое формирование дислокационных стенок (рис. 5). При увеличении значения параметра G , что соответствует снижению температуры, происходит снижение стационарной плотности дислокационных стенок (рис. 5, б).

К третьей группе относятся параметры F и K_τ , при изменении значений которых структура фазового пространства не изменяется (рис. 6). Стационарная плотность дислокационных стенок при росте значения параметра F повышается (рис. 6, б), при росте значения параметра K_τ понижается (рис. 6, з).

Отметим, что характер влияния изменения параметров на поведение деформационной дефектной подсистемы для меди и никеля качественно одинаков, существуют лишь небольшие количественные различия наиболее всего заметные для модуля сдвига G , числа дислокаций в стенке n и доли винтовых дислокаций ω_s .

Как показал анализ возможностей эволюции дефектной подсистемы, состоящей из дислокаций и дислокационных стенок, существует два основных варианта ее развития в зависимости от исходного состояния материала и воздействия на него.

1. В зависимости от исходного дефектного состояния материала развитие дефектной подсистемы идет в направлении одного из двух возможных стационарных состояний (рис. 2, з, е). Такое развитие возможно при экстремальных значениях параметров.

2. Развитие дефектной подсистемы независимо от исходного дефектного состояния в широком спектре физически реальных значений параметров системы осуществляется в направлении стационарного состояния, которое характеризуется: 1) ненулевыми значениями стационарной плотности дислокаций и стационарной плотности дислокационных стенок (рис. 2, а, б); 2) ненулевым значением стационарной плотности дислокаций и нулевым значением стационарной плотности дислокационных стенок (рис. 2, в); 3) ненулевым значением стационарной плотности дислокаций и произвольным значением стационарной плотности дислокационных стенок (рис. 2, д).

ЛИТЕРАТУРА

1. Orlov A.N. // Theory of Crystal Defects. Prague. Prague Academia. 1966. P. 317–338.
2. Lagneborg R. // Intern. Metals Rev. 1972. V. 17. P. 130–146.
3. Essman U., Mugrabi H. // Phil. Mag. 1979. V. 40. P. 721–756.
4. Ханнанов Ш.Х. // Математические модели пластичности. Томск. 1991. С. 11–16.
5. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. // Изв. вузов. Физика. 1982. № 6. С. 56–82.
6. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М., 1984.

7. Попов Л.Е., Пудан Л.Я., Колупаева С.Н. и др. Математическое моделирование пластической деформации. Томск. 1990.
8. Колупаева С.Н. и др. Неустойчивости пластической деформации кристаллов. Томск, 1994.
9. Старенченко В.А., Колупаева С.Н., Коцюрбенко А.В. // Зав. лаборатория. 1995. № 8. С. 28–35.
10. Старенченко В.А., Колупаева С.Н., Коцюрбенко А.В. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 4. С. 9–12.
11. Онопченко Т.В., Колупаева С.Н., Старенченко В.А. // Физическая мезомеханика. 2000. № 6. С. 65–73.
12. Старенченко В.А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование деформационного и термического упрочнения монокристаллов ГЦК чистых металлов и сплавов со сверхструктурой $L1_2$: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 1991.
13. Абзаев Ю.А., Старенченко В.А., Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вузов. Физика. 1987. № 3. С. 65–70.
14. Козлов Э.В. и др. Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Томск, 1991.

УДК 539.4

В.Н. Козлов

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Томский государственный педагогический университет

Расчет износостойких покрытий, оценка прочности инструмента требуют знания величины и характера распределения контактных нагрузок на поверхности инструмента. При резании труднообрабатываемых материалов, таких как титановые и жаропрочные сплавы, эта задача особенно актуальна в связи с интенсивным износом инструмента. В этих случаях инструмент изнашивается в основном по задней поверхности, что вызывает рост сил резания и увеличение вероятности разрушения режущей части инструмента [1].

Контактные нагрузки на рабочих поверхностях инструмента могут быть измерены тремя методами: поляризационно-оптическим, интерференционным и методом разрезного резца. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Поляризационно-оптический метод лишь моделирует процесс резания и не позволяет измерять контактные нагрузки при применении реальных инструментальных и обрабатываемых материалов. Интерференционный метод позволяет измерять нагрузки по картине полос на боковой поверхности инструмента лишь на некотором удалении от места контакта обрабатываемого материала с инструментом, что вносит погрешности в определение действительных контактных нагрузок. Метод разрезного резца лишен этого недостатка, но требует создания высокожестких динамометров.

Многолетний опыт применения метода разрезного резца показывает, что необходимо не только контролировать неизменность составляющих сил резания, но и учитывать разность измерительных перемещений частей разрезного резца в процессе резания. При измерении контактных нагрузок на задней поверхности резца при прямоугольном свободном резании диска из обрабатываемого материала измеряются силы, действующие на пластину А и на пластину Б (рис. 1). Увеличивая последовательно длину участка h_{31} при неизменной длине фаски износа h_{32} , рас-

считываем контактные нагрузки как отношение приращения силы к приращению площади контакта на пластине А.

При врезании на площадку длиной h_{31} пластины А действует сила больше, чем на площадку h_{32} пластины Б, что вызывает большую деформацию упругих измерительных элементов 3. Появившийся острый уступ начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания. Щель между пластинами забивается, что приводит к нарушению условий измерения сил.

Анализ вариантов различных схем измерений показывает, что для устранения указанных нежелательных явлений необходимо изменить либо конструкцию динамометра, либо схему резания. Второй путь менее трудоемкий. По этому варианту пластина Б должна измерять приращение сил на задней поверхности резца (рис. 2). При врезании под действием сил на площадке

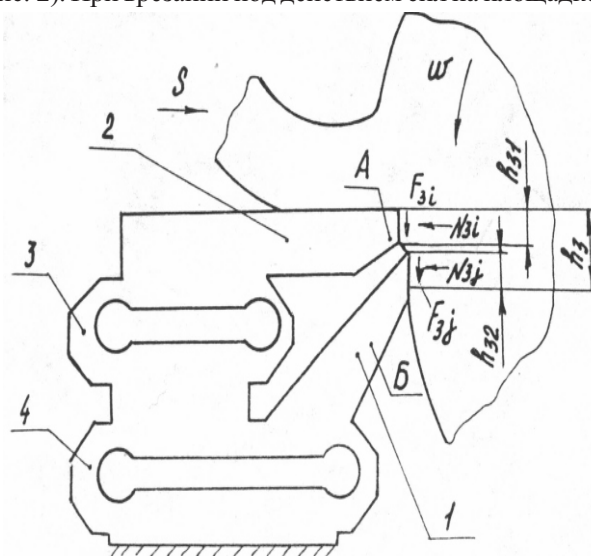


Рис. 1. Схема работы динамометра при исследовании контактных нагрузок на задней поверхности резца на токарном станке