

Л. И. Гурский

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь*

ДЕФОРМИРОВАННОЕ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОКАТКЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ, ДИСЛОКАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ВНУТРЕННЕГО СЛОЯ – НИКЕЛЕВАЯ ФОЛЬГА

Аннотация. Рассматриваются деформированное и напряженное состояния при прокатке трехслойного пакета из различных металлов, внутренний слой – никелевая фольга. Описывается методика определения плотности дислокаций. Приводятся результаты влияния условий деформирования на распределение и плотность дислокаций при прокатке никелевой фольги в различных пакетах, в том числе фиксирование или установление дислокационной структуры никелевой фольги до деформации и при различных степенях деформации. Показано, что решающее влияние на развитие дислокационной структуры и свойств оказывает механическая схема деформации внутреннего слоя пакета, а именно деформация никелевой фольги неравномерным сжатием со сдвигом. Установлено, что плотность дислокаций определяется не только степенью деформации, но и схемой деформированного и напряженного состояния вещества, причем для случая сдвиговой деформации с увеличением степени деформации плотность дислокаций увеличивается более интенсивно, чем при деформации растяжением или сжатием без сдвига. При этом в результате деформации сдвигом происходит значительное измельчение структуры материалов: с увеличением степени пластической деформации в веществе формируется трехмерный ячеистый каркас, границы ячеек которого состоят из сплетений дислокаций. По мере возрастания степени деформации плотность дислокаций в границах ячеек увеличивается, а размеры областей внутри ячеек уменьшаются; между тем области внутри ячеек дислокационного каркаса всегда оказываются свободными от дислокаций. Полученные результаты позволяют рекомендовать схемы с деформацией сдвигом для новых перспективных процессов получения материалов с уникальными свойствами.

Ключевые слова: прокатка, трехслойный пакет, степень деформации, сдвиг, напряженное состояние, деформированное состояние, плотность дислокаций

Для цитирования: Гурский, Л. И. Деформированное и напряженное состояния материалов при прокатке трехслойных пакетов, дислокационная структура внутреннего слоя – никелевая фольга // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 270–279. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-270-279>

Leonid I. Hurski

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

DEFORMED AND STRESSED STATES OF MATERIALS AT THE ROLLING OF THREE LAYER STACKS, DISLOCATION STRUCTURE OF INNER LAYER – NICKEL FOIL

Abstract. The deformed and stressed states during rolling of a three-layer stack from various materials with a nickel foil inner layer are considered. The technique of determining the density of dislocations is described. The data about the influence of deformation conditions on the distribution and density of dislocations during rolling of nickel foil in various stacks are presented, including the registration or determination of the dislocation structure of nickel foil before deformation and at various degrees of deformation. It is shown that the mechanical scheme of deformation of the inner layer of the stack, namely, the deformation of the nickel foil by non-uniform compression with shear, has a decisive influence on the development of the dislocation structure and properties. It is established that the dislocation density is determined not only by the degree of deformation, but also by a scheme of the deformed and stressed state of matter, and for the case of shear deformation with increasing degree of deformation the dislocation density increases more rapidly than in the case of tensile strain or compression without shear; the result of shear deformation is a significant refinement of the structure of materials: with increasing degree of plastic deformation of the material a three-dimensional cellular network of dislocation is formed, wherein the borders of cells are formed by tangles of dislocations. With increasing degree of deformation, the density of dislocations at the cell boundaries increases, and the size of the cells decreases; in this case, the areas inside the cells of the dislocation network are always free of dislocations. The obtained results allow recommending the schemes with shear deformation for new promising processes of production of materials with unique properties.

Keywords: rolling, three-layer stack, degree of deformation, shear, stressed state, strained state, dislocation density

For citation: Hurski L.I. Deformed and stressed states of materials at the rolling of three layer stacks, dislocation structure of inner layer – nickel foil. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 270–279 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-270-279>

Введение. Наиболее характерные физико-химические свойства вещества определяются пространственной группой симметрии, типом пространственной решетки Браве, сингонией, зонной структурой, статистическими распределениями, фазовой диаграммой состояния, термодинамическими характеристиками. При получении веществ и при воздействиях на них (излучение, радиация, пластическая деформация, термообработка и др.) возникают различные дефекты (вакансии, междоузельные атомы, краевые, винтовые и смешанные дислокации, границы между зёрнами и блоками и др.). При оптимальных технологических режимах получения веществ количество дислокаций (плотность) составляет $\sim (10-10^5) \text{ см}^{-2}$, а при различных воздействиях может достигать значений $\sim (10^6-10^{12}) \text{ см}^{-2}$. Плотность дислокаций в веществах можно уменьшить с помощью термообработки.

Цели и задачи исследования. Основная цель исследования – анализ деформированного и напряженного состояний слоев при прокатке трехслойных пакетов, наружные слои которых выполнены из различных материалов, и изучение дислокационной структуры внутреннего слоя – никелевой фольги.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1) рассмотреть схемы пластической деформации пакетов, наружные слои которых выполнены из алюминия, стали, никеля, а внутренним слоем является никелевая фольга, и выполнить анализ деформированного и напряженного состояний указанных пакетов;

2) определить методы установления плотности дислокаций и разработать методику определения плотности дислокаций в веществах с использованием электронного микроскопа;

3) изучить дислокационную структуру никелевой фольги до и после деформации и привести электронные фотографии структуры никелевой фольги при различных степенях деформации пакета сталь–никель–сталь.

Деформированное и напряженное состояния металлов трехслойных пакетов при прокатке.

Схемы деформаций. Соотношения между геометрическими параметрами очага деформации прокатного стана следующие: 1) $D \gg L_q$, 2) $L_q \gg H_0$, 3) $H_0 \gg h$. Первое неравенство указывает соотношение размеров валков и очага деформации, второе неравенство – прокатку с малыми единичными обжатиями (степенями деформации) за проход: $(H_0 + h_0) - (H_1 + h_1) / (H_0 + h_0)$, третье неравенство – прокатку фольги.

Таким образом, толщина наружных пластин пакета является величиной второго, а толщина фольги – третьего порядка малости относительно диаметра валков D и очага деформации L_q (рис. 1).

Так как у материалов трехслойного пакета различные значения пределов текучести k : Ni (k_1 , $\sigma_{0,2} \sim (1,6-2,5)$ МПа, Al (k_2 , $\sigma_{0,2} \sim (50-80)$ МПа, Fe (k_3 , Ст45 $\sigma_{0,2} \sim (245-275)$ МПа), – то возможны три схемы деформации с различными вариантами наружных слоев.

Схема 1. Наружные слои – алюминий. Наружные слои пакета деформируются сильнее внутреннего слоя (никелевая фольга). В этом случае $k_2 > k_1$. Напряженное состояние и распределение сил трения на контактной поверхности алюминий – никелевая фольга показаны на рис. 1, а.

Схема 2. Наружные слои – сталь. Материал никелевая фольга деформируется сильнее по сравнению с наружными пластинами из стали. В этом случае $k_3 > k_2$. Напряженное состояние и распределение сил трения на контактной поверхности сталь – никелевая фольга показано на рис. 1, б.

Схема 3. Наружные слои – никель. Внутренний слой никелевая фольга и наружные никелевые слои пакета деформируются примерно одинаково. Это имеет место, если пределы текучести наружных слоев – никель и внутреннего слоя – никелевая фольга приблизительно одинаковы. Разрыв скорости на контактной поверхности равен нулю, а напряженное состояние и распределение сил трения на контактной поверхности показаны на рис. 1, в.

При заданных параметрах D , L_q , H , h , τ_k'' , τ_k''' действительная картина в очаге деформации должна определяться из условий минимума работы пластической деформации. (Здесь и далее τ_k'' – трение между верхней и нижней пластинами пакета и никелевой фольгой, τ_k''' – трение между валками и верхней и нижней пластинами пакета.)

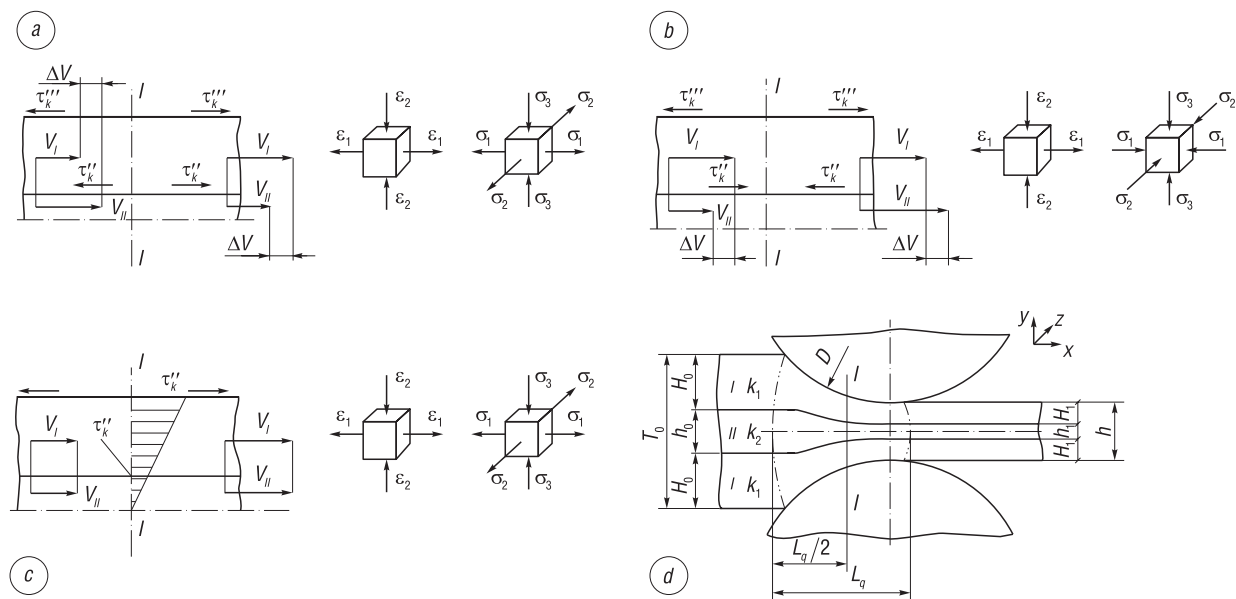


Рис. 1. Схемы распределения скоростей, деформаций и напряжений при прокатке трехслойных пакетов с внутренним слоем никелевая фольга: *a* – пакет алюминий–никель–алюминий; *b* – пакет сталь–никель–сталь; *c* – пакет никель–никель–никель; *d* – схема, иллюстрирующая деформацию прокаткой трехслойного пакета

Fig. 1. Diagrams of distribution of velocities, strains and stresses during rolling of three-layer packages with an inner layer of nickel foil: *a* – aluminum-nickel-aluminum package; *b* – steel-nickel-steel package; *c* – nickel – nickel – nickel package; *d* – a diagram illustrating the rolling deformation of a three-layer stack

Для анализа общих особенностей процесса деформации прокаткой можно ограничиться рассмотрением указанных схем. Заметим, что во всех случаях пластическое состояние достигается как для никелевой фольги, так и для верхней и нижней пластин пакета. Так как ширина пакета B значительно превышает его толщину T_0 ($2H_0 + h_0$), $B \gg T_0$, то деформация может рассматриваться как плоская.

Схема 1 (см. рис. 1, *a*). Касательные напряжения на контакте уравниваются внутренними напряжениями σ_x , то есть для фольги $\sigma_x h = \tau_k'' x$, где x – расстояние от конца очага деформации до сечения I–I. На расстоянии $x = L_q = \sigma_s h / \tau_k''$ достигается предел текучести на растяжение никелевой фольги. Если напряжение τ_k'' и напряжение σ_s одного порядка, то длина очага деформации L_q тоже будет одного порядка с высотой h . Области контакта вала с пакетом, вдоль которых действуют напряжения τ_k'' , будут по сравнению с длиной очага деформации L_q величинами третьего порядка малости. В результате линейного растяжения никелевой фольги контакты между валами верхней и нижней пластин из алюминия будут нарушаться.

Схема 2 (см. рис. 1, *b*). Для внутреннего слоя пакета никелевой фольги с осью симметрии I–I и контактным трением τ_k'' схема действия сил будет определяться деформацией сжатия со сдвигом. Схема действия сил для наружных слоев (сталь) близка к сжатию. Сопряжение двух решений на границах I и II возможно только в случае, если толщина никелевой фольги $h(x)$ изменяется по определенному закону. Влияние этого изменения на толщину пакета $T(x)$ несущественно, и напряженное состояние должно определяться условиями деформации слоев пакета состава сталь–никель–сталь.

Схема 3 (см. рис. 1, *c*). Так как относительное проскальзывание слоев I и II отсутствует, то силы трения на границе I–II примерно равны $\tau_k'' = (h/T) \tau_k''' \ll 1$, поэтому их влиянием на напряженное состояние никелевой фольги можно пренебречь. Граница раздела I–II эквивалентна оси симметрии для слоя I.

Таким образом, состояние никелевой фольги определяется условиями сжатия с нулевым трением, а состояние наружных пластин (никель) – условиями сжатия с трением. Также на рис. 1 можно видеть, что деформированное состояние во всех трех случаях соответствует значениям $\varepsilon_y = \varepsilon_z < 0$, $\varepsilon_x = \varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_z = 0$. Для схем на рис. 1 *a, b* напряженного состояния на оси получа-

ем $\sigma_y = \sigma_3 < 0$, $\sigma_x = \sigma_1 < 0$, $\varepsilon_z = (\sigma_3 + \sigma_1)/2 < 0$, а для схемы на рис. 1, c – $\sigma_y = \sigma_3 = 0$, $\sigma_x = \sigma_1 = \sigma_s > 0$, $\varepsilon_z = \sigma_s/2 = \sigma_2 > 0$.

Деформированное состояние металлов в трехслойном пакете при прокатке. Для схем на рис. 1, a , c состояние соответствует однородному линейному растяжению-сжатию при плоской деформации. Для схемы на рис. 1, b состояние соответствует однородному линейному сжатию со сдвигом. Таким образом, для схемы деформации на рис. 1, a и c получаем:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \ln(h_0/h).$$

После выхода из очага деформации деформация ε_1 определяется как

$$\varepsilon_1 = \ln(h_0/h_1).$$

Для схемы на рис. 1, b слой фольги находится в условиях сжатия со сдвигом и, используя решение Прандтля для скоростей [1], получаем уравнение

$$v_x = C + V(x/h) - (2V/m)\sqrt{1 - (m^2 y^2 / h^2)}, \quad v_y = -V(y/h),$$

где C – постоянная, v – скорость деформирования, m – относительная величина контактного трения, $m = \tau_k'' / k_2$, скорость деформации на оси симметрии $\xi_x = -\xi_y = dv_x / dx = V / h$. За время dt приращение деформации на оси x : $d\varepsilon_x = \xi_x dt = (V/h)dt$. Очевидно, что $dt = -dh/V$, и тогда $d\varepsilon_x = -dh/h$. Отсюда имеем конечную деформацию металла на оси за один этап: $\varepsilon_x = \ln(h_0/h_1)$, то есть такую же величину деформации, что и при однородной линейной деформации сдвигом.

При сжатии никелевой фольги удобно измерять не изменение толщины фольги, а ее удлинение, например, по изменению расстояния между двумя метками, нанесенными на поверхность фольги. В случаях однородного линейного состояния это изменение сразу дает логарифмические деформации. Проверим это для схемы на рис. 1, b . Если расстояние между метками в исходном состоянии Δx_0 , то разность скоростей между метками будет $\Delta v_x = V(\Delta x_0/h)$. За время dt величина Δx_0 получит следующее увеличение

$$d(\Delta x_0) = \Delta v_x dt = V(\Delta x_0/h) dt = \Delta x_0 dh / h.$$

После интегрирования получаем показатель деформации

$$\ln(\Delta x / \Delta x_0) = \ln(h_0 / h),$$

то есть тот же показатель деформации, что и для изменения толщины. Таким образом, если логарифмический показатель деформации во всех случаях сохраняется постоянным, то интенсивности деформаций точек на оси также совпадают для всех трех схем.

Напряженное состояние металлов в трехслойном пакете при прокатке. Для схемы на рис. 1 a в слое фольги есть линейное растяжение и величина гидростатического давления составляет $p = \sigma_s / 2 = k_2 > 0$.

Для схемы на рис. 1, c справедливо линейное сжатие и напряжения по сечению распределены равномерно. Давление на контакте находится из решения для сжатия тонкого слоя I:

$$\sigma_y / k_1 = -C - (mx/H), \quad \tau_{xy} = (my/H),$$

где $m = \tau_k''' / k_1$. Из условия отсутствия натяжений на границах очага деформации для слоя I будем примерно иметь $-C \approx 2$. Тогда нормальное напряжение на границе I–II находится при $C = 0$:

$$\sigma_y = -2k_1 - (\tau_k''' x / H).$$

Используя условие пластичности, для слоя I получаем действующие напряжения:

$$\sigma_x = \sigma_y + 2k_2 = -2k_1 - (\tau_k''' x / H) + 2k_2.$$

Гидростатическое давление в слое фольги определится выражением

$$p = 2k_1 - (\tau_k''' x / H) + k_2.$$

Для схемы на рис. 1, *b* для внутреннего слоя пакета (никелевая фольга) используется решение для сжатия со сдвигом согласно [2]:

$$\tau_{xy} / k_1 = (1+x) / 2 + (1-x)y / H, \quad \sigma_y / k_1 = -C - (1-x)(x / H), \quad \sigma_x / k_1 = \sigma_y / k_1 + 2\sqrt{1 - (\tau_{xy} / k_1)^2},$$

$$\sigma_x / k_1 = \sigma_y / k_1 + 2\sqrt{1 - (\tau_{xy} / k_1)^2},$$

где $x = \tau_k'' / \tau_k'''$. Из этих уравнений для границы I–II имеем

$$\sigma_y = -C - (\tau_k''' - \tau_k'')(x / H).$$

Из условия отсутствия натяжений на границе очага деформации для слоя I, где $C \cong 2k_1$, получаем

$$\sigma_y = -2k_1 - (\tau_k''' - \tau_k'')(x / H),$$

а из условия пластичности для слоя II –

$$\sigma_x = -2k_1 - (\tau_k''' - \tau_k'')(x / H) + 2k_2.$$

При этом гидростатическое давление в слое II определится формулой

$$p = -2k_1 - (\tau_k''' - \tau_k'')(x / H) + k_2.$$

Таким образом, можно заключить, что для схем на рис. 1 *b, c* распределение гидростатического давления является линейным. Однако для схемы на рис. 1, *b* распределение гидростатического давления зависит от соотношения трения на контакте внешних слоев пакета с валками и на границе раздела наружных слоев и внутреннего слоя (никелевая фольга) пакета. При $\tau_k''' = \tau_k''$ значение p будет определяться, как $p = -2k_1 + k_2$. При $\tau_k''' = 0$ значение p будет равно $p = -2k_1 - (\tau_k'' x / H) + k_2$.

Отсюда следует, что гидростатическое давление возрастает от схемы на рис. 1 *a*, где оно растягивающее, до схемы рис. 1, *b*, где оно сжимающее со сдвигом. Схема рис. 1, *c* является промежуточной относительно гидростатического давления.

Распределение гидростатического давления по длине очага деформации показано на рис. 2 (зависимости 1–3 соответственно для схем рис. 1, *a–c*).

Таким образом, три рассмотренных случая прокатки в пакетах характеризуются различным гидростатическим давлением и схемами деформации. При этом для внутреннего слоя (никелевая фольга) по направлению прокатки пакета характерны три схемы деформации: линейное растяжение (см. рис. 1, *a*), неоднородное сжатие со сдвигом (см. рис. 1, *b*) и однородное сжатие без сдвига (см. рис. 1, *c*). Перемещаясь по очагу деформации, элементарный объем на оси внутреннего слоя (никелевая фольга) в зависимости от условий деформирования, характерных для каждой схемы в отдельности, не будет иметь одни и те же условия. Характер действия сил в очаге деформации окажет определенное влияние на закономерности формирования структуры деформируемого тела. Эти особенности и будут далее рассмотрены для неоднородного сжатия со сдвигом (см. рис. 1, *b*) и линейного растяжения (см. рис. 1, *a*).

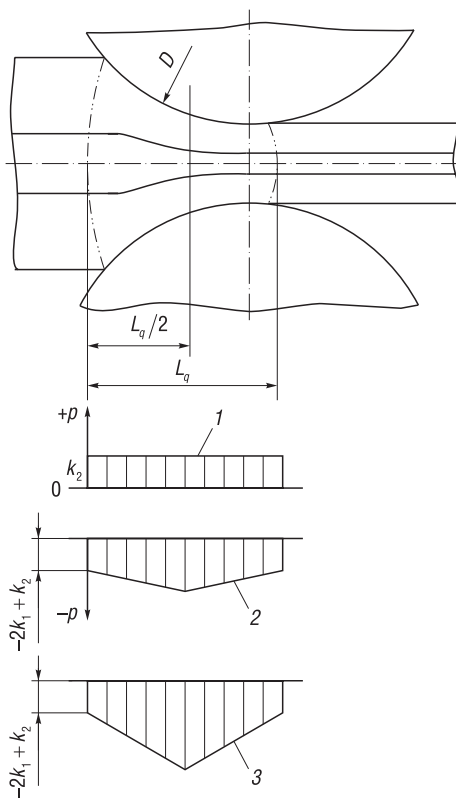


Рис. 2. Распределение гидростатического давления по длине очага деформации: 1 – для схемы на рис. 1, *a*; 2 – для схемы на рис. 1, *b*; 3 – для схемы на рис. 1, *c*

Fig. 2. Distribution of hydrostatic pressure along the length of the deformation zone: 1 – for the diagram in Figure 1, *a*; 2 – for the circuit in Figure 1, *b*; 3 – for the circuit in Figure 1, *c*

Методика определения плотности дислокаций. Известна методика определения плотности дислокации при помощи просвечивающей электронной микроскопии Д. Бэйли и П. Хирша [3–15], однако она громоздка, так как необходимо по электронно-микроскопической фотографии определить суммарную проекцию всех дислокационных линий. Согласно [13–15], плотность дислокаций ρ_d определяется по электронно-микроскопическим фотографиям с использованием выражения $\rho_d = 2N/Lt$, где N – число пересечений дислокаций с линиями ортогональной сетки, нанесенной на фотографию; L – длина линий сетки; t – толщина образца. Число пересечений линий с дислокациями должно быть не менее 50. Относительная погрешность этого метода составляет $\sim 20\%$.

В [16] подробно рассмотрены методики определения плотности дислокаций. В результате предложено определять плотность дислокаций по 20–25 электронно-микроскопическим фотографиям с одного и того же образца. Такой метод применим для плотности дислокаций от 10^7 до 10^{12} см^{-2} . При плотности дислокаций 10^7 см^{-2} и меньше следует использовать метод рентгеновской топографии либо определять плотность дислокаций по ямкам травления, так как получить изображение отдельных дислокаций при плотности 10^7 см^{-2} и меньше с использованием просвечивающего электронного микроскопа практически невозможно.

В данной работе при экспериментальном определении плотности дислокаций с использованием электронного микроскопа (универсальный электронный микроскоп УЭМВ-100В) применялась формула $\rho_d = \sum_0^n l_i / V$, согласно которой плотность дислокаций определяется как отношение суммарной длины всех дислокационных линий в структуре материала к его объему, где l_i – длина линии отдельной дислокации, V – объем материала.

Влияние условий деформирования на распределение и плотность дислокаций при прокатке. Данные определения плотности дислокации при помощи просвечивающей электронной микроскопии позволили экспериментально изучить закономерности формирования дислокационной структуры внутреннего слоя (никелевая фольга) в зависимости от гидростатического давления и механических схем деформации элементарных объемов фольги на оси пакета. При небольших степенях деформации (до $\sim 10\%$) была установлена только одна система скольжения $\{111\}\langle 10\bar{1}\rangle$. При дальнейшем увеличении степени деформации определить систему скольжения оказалось невозможным.

Построенный по экспериментальным данным график изменения плотности дислокаций ρ_d в зависимости от степени деформации при прокатке пакетов алюминий – никелевая фольга – алюминий и сталь – никелевая фольга – сталь представлен на рис. 3 [6, 17–19].

Согласно экспериментальным данным, приведенным на рис. 3, плотность дислокаций увеличивается более интенсивно с увеличением степени деформации при прокатке в жестких пакетах сталь–никель–сталь, напряженное состояние – неравномерное сжатие со сдвигом.

В этом случае плотность дислокаций сильно деформированной никелевой фольги ($\epsilon > 50\%$) более чем на порядок превышает значения плотности дислокаций никелевой фольги, деформированной прокаткой в мягких пакетах алюминий–никель–алюминий, напряженное состояние – линейное растяжение. При этом в различных пакетах по мере увеличения степени деформации качественное изменение дислокационной структуры внутренних слоев пакетов (никелевая фольга) проходит близкие стадии, но при различных степенях деформации.

Дислокационные структуры никелевой фольги поясняются электронными фотографиями до деформации (рис. 4) и при различных степенях деформации никелевой фольги по схеме рис. 1, b (рис. 5).

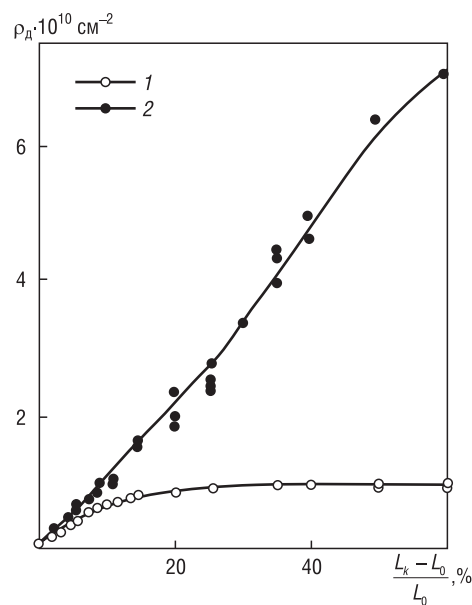


Рис. 3. Зависимости изменения плотности дислокаций от степени деформации при прокатке в пакетах алюминий–никель–алюминий (1) и сталь–никель–сталь (2)

Fig. 3. Dependencies of the change in the density of dislocations on the degree of deformation during rolling in packages aluminum–nickel–aluminum (1) and steel–nickel–steel (2)

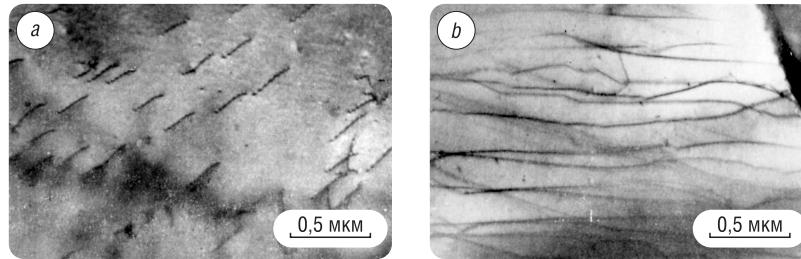


Рис. 4. Дислокационная структура никелевой фольги до деформации: *a* – участок фольги с дислокациями, расположенными под большим углом к поверхности фольги; *b* – участок фольги с дислокациями, расположенными параллельно поверхности фольги

Fig. 4. Dislocation structure of nickel foil before deformation: *a* – foil section with dislocations located at a large angle to the foil surface; *b* – foil area with dislocations parallel to the foil surface

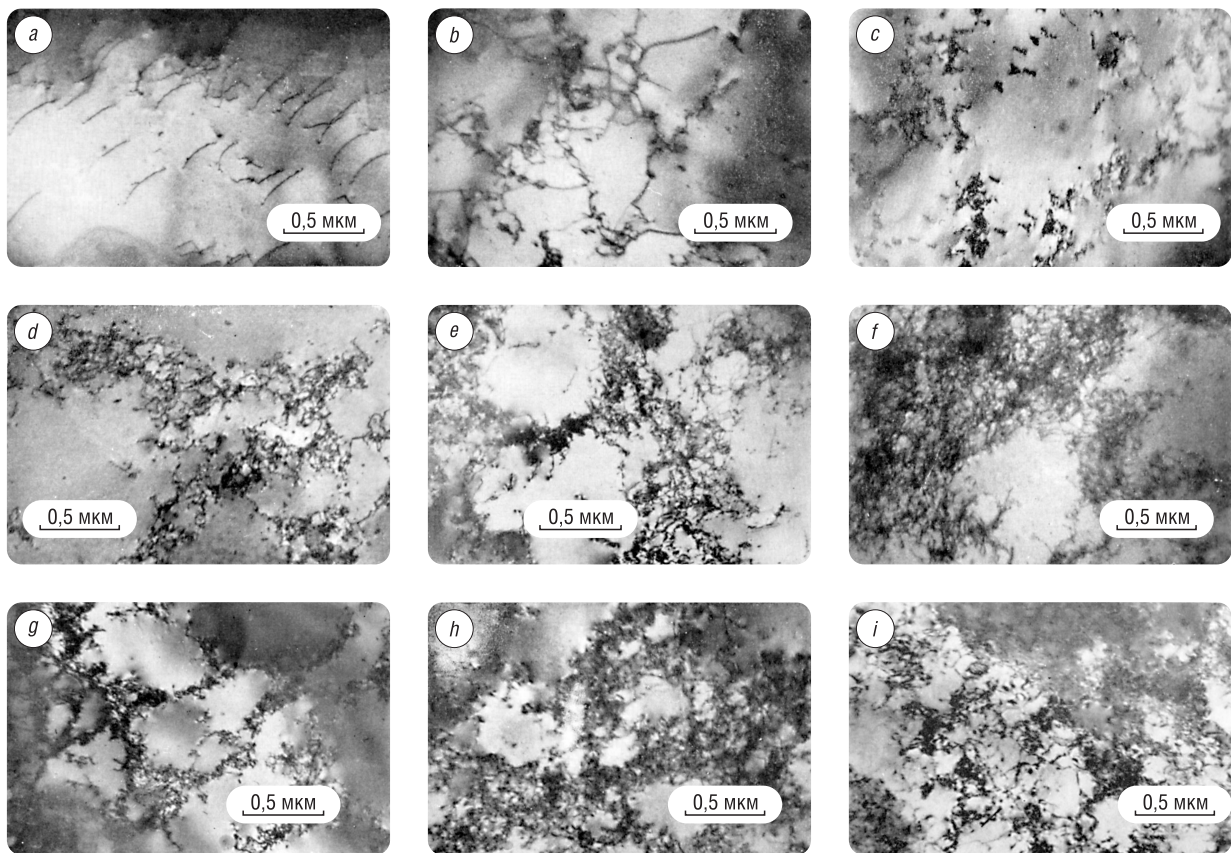


Рис. 5. Дислокационная структура никелевой фольги, деформированной на: *a* – 1 % ($\rho_d = 1,3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *b* – 3 % ($\rho_d = 3,3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *c* – 5 % ($\rho_d = 5,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *d* – 7 % ($\rho_d = 7,4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *e* – 15 % ($\rho_d = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *f* – 20 % ($\rho_d = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *g* – 25 % ($\rho_d = 2,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *h* – 40 % ($\rho_d = 5,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *i* – 60 % ($\rho_d = 6,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$)

Fig. 5. Dislocation structure of nickel foil deformed by: *a* – 1 % ($\rho_d = 1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *b* – 3 % ($\rho_d = 3.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *c* – 5 % ($\rho_d = 5.6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *d* – 7 % ($\rho_d = 7.4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$); *e* – 15 % ($\rho_d = 1.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *f* – 20 % ($\rho_d = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *g* – 25 % ($\rho_d = 2.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *h* – 40 % ($\rho_d = 5.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$); *i* – 60 % ($\rho_d = 6.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$)

Величины гидростатического давления и схемы деформации при прокатке в жестких пакетах – деформация сдвигом, и прокатке в мягких пакетах – деформация линейное сжатие, также отличаются друг от друга. Особенности деформации в различных пакетах оказывают разное влияние на зарождение и перемещение дислокаций и в итоге – на формирование ячеистой дислокационной структуры.

Обсуждение результатов исследования. Три рассмотренных случая прокатки в пакетах характеризуются различным гидростатическим давлением и схемами деформаций. При этом для внутреннего слоя (никелевая фольга) по направлению прокатки пакета могут иметь место три схемы деформации: линейное растяжение (схема рис. 1, *a*), неоднородное сжатие со сдвигом (схема рис. 1, *b*) и однородное сжатие без сдвига (схема рис. 1, *c*).

Установлено, что стадии формирования дислокационной структуры у деформированной в пакетах никелевой фольги наблюдаются при различных степенях деформации:

у никелевой фольги, деформированной прокаткой в пакетах сталь–никель–сталь, трехмерная ячеистая дислокационная сетка образуется при степенях деформации ($\varepsilon \sim (7-10) \%$);

у никелевой фольги, деформированной прокаткой в пакетах алюминий–никель–алюминий, трехмерная ячеистая дислокационная сетка образуется при степенях деформации ($\varepsilon \sim (15-20) \%$).

В процессе пластической деформации непрерывно рождаются новые дислокации и исчезают старые, выходя на поверхность или в результате аннигиляции. Пусть $d\rho_{д,р}/dt$ – количество дислокаций, рожденных всеми источниками в единицу времени, а $d\rho_{д,и}/dt$ – количество исчезнувших дислокаций. Если $d\rho_{д,р}/dt = d\rho_{д,и}/dt$, то количество оставшихся в кристалле дислокаций $\rho_{д0}$ не зависит от степени деформации. Количество исчезнувших дислокаций пропорционально деформации при прокатке пакетов $d\rho_{д,и} \sim \varepsilon$. Если скорость деформации постоянна $d\varepsilon/dt = \text{const}$, то, следовательно, $d\rho_{д,и}/dt = \text{const}$.

Всегда при исследовании прокатанных образцов никелевой фольги по схемам рис. 1, *a–c* количество дислокаций, выходящих на поверхность фольги или аннигилирующих в единицу времени, будет постоянным, так как скорость деформации постоянна. Вместе с тем количество рождающихся дислокаций с увеличением степени деформации все время растет, и, следовательно, растет плотность оставшихся в фольге дислокаций $\rho_{д0}$. Эти процессы имеют место вследствие того, что дислокации, перемещаясь, задерживаются у препятствий, образуя скопления, способные задержать последующие дислокации. Если деформировать пакеты, к которым приложено различное гидростатическое давление, то, согласно теории пластичности, оно не должно влиять на ход деформационного процесса. Однако в настоящей работе при экспериментальных исследованиях прокатки трехслойных пакетов наблюдались изменения дислокационной структуры деформированной в различных пакетах никелевой фольги, а, следовательно, и в деформационном упрочнении.

Результаты выполненных исследований убедительно показывают, что решающее влияние на развитие дислокационной структуры и свойств оказывает механическая схема деформации внутреннего слоя пакета, а именно деформация никелевой фольги неравномерным сжатием со сдвигом.

При сложном напряженном состоянии у поликристаллических образцов действует несколько систем скольжения. От активности вторичных систем скольжения зависят количество скоплений и эволюция формирования дислокационной структуры. Чем больше дислокаций генерируется во вторичных системах скольжения и чем больше их подвижность, тем на более ранних стадиях деформации происходит формирование ячеистой дислокационной сетки.

Представлены кривые изменения плотности дислокаций, определенной по электронным фотографиям в зависимости от степени деформации при холодной прокатке никелевой фольги в различных условиях. Эти кривые не являются линейными, в то время как дислокационные теории упрочнения дают для гранецентрированных кубических металлов линейную зависимость $\rho_{д} \sim \varepsilon$. Экспериментальные результаты свидетельствуют, что плотность дислокаций увеличивается не пропорционально степени деформации ε , а быстрее при прокатке пакета, где наружные слои – сталь, или медленнее при прокатке пакета, в котором наружные слои – алюминий (см. рис. 4). Экспериментально было установлено, что для рассмотренных случаев прокатки имеет место степенная зависимость изменения плотности дислокаций $\rho_{д} = C\varepsilon^m$, где показатель степени m находится в пределах от 1 до 1/2.

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов:

1) плотность дислокаций определяется не только степенью деформации, но и схемой деформированного и напряженного состояний вещества; при деформации сдвигом с увеличением степени деформации плотность дислокаций увеличивается более интенсивно, чем при деформации растяжением или сжатием без сдвига; при этом в результате деформации сдвигом происходит значительное измельчение структуры веществ;

2) по мере увеличения степени пластической деформации в веществе формируется трехмерный ячеистый каркас; границы ячеек этого каркаса состоят из сплетений дислокаций;

3) по мере увеличения степени деформации плотность дислокаций в границах ячеек увеличивается, а размеры областей внутри ячеек уменьшаются; при этом области внутри ячеек дислокационного каркаса всегда оказываются свободными от дислокаций.

Полученные результаты позволяют рекомендовать схемы с деформацией сдвигом для новых перспективных процессов получения материалов с уникальными свойствами.

Благодарности

Автор выражает благодарность А.Л. Гурскому за полезные дискуссии и подготовку материала к печати.

Acknowledgments

The author expresses his gratitude to A.L. Gursky for useful discussions and preparation of the material for publication.

Список использованных источников

1. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 408 с.
2. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.
3. Ван-Бюрен, Х.Г. Дефекты в кристаллах / Х.Г. Ван-Бюрен. – М.: Иностран. лит., 1962. – 610 с.
4. Урусов, В.С. Геохимия твердого тела / В.С. Урусов, В.Л. Таусон, В.В. Акимов. – М.: ГЕОС, 1997. – 304 с.
5. Козлова, О.Г. Рост и морфология кристаллов / О.Г. Козлова. – М.: Моск. ун-т, 1972. – 304 с.
6. Северденко, В.П. Структура в объеме и на поверхности прокатанных материалов / В.П. Северденко, Л.И. Гурский. – Минск: Наука и техника, 1972. – 308 с.
7. Новиков, И.И. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки / И.И. Новиков, К.М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
8. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
9. Фридель, Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М.: Мир, 1967. – 643 с.
10. Финкель, В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
11. Владимиров, В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
12. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для студентов вузов / А.В. Шишкин [и др.]. – М.: Омега Л, 2006. – 752 с.
13. Северденко, В.П. Структура тонких металлических пленок / В.П. Северденко, Э.И. Точицкий. – Минск: Наука и техника, 1968. – 180 с.
14. Северденко, В.П. Прокатка с малыми обжатиями / В.П. Северденко, Л.И. Гурский. – Минск: Наука и техника, 1968. – 188 с.
15. Распределение плотности дислокаций при пластической деформации металлов / В.П. Северденко [и др.] // Материаловедение и термическая обработка: сб. – Минск: Наука и техника, 1965. – С. 49–57.
16. Штремель, М.А. Возможности электронномикроскопического измерения плотности дислокаций / М.А. Штремель, Б.Г. Беляков // Физика металлов и материаловедение. – 1968. – Т. 25, № 1. – С. 140–151.
17. Изменение дислокационной структуры никеля в процессе пластической деформации / В.П. Северденко [и др.] // Пластичность и обработка металлов давлением: сб. – Минск: Наука и техника, 1968. – С. 5–12.
18. Гурский, Л.И. Энергетическое состояние дислокаций / Л.И. Гурский // Пластическая деформация и обработка металлов давлением: сб. – Минск: Наука и техника, 1969. – С. 284–288.
19. Гурский, Л.И. Процессы, связанные с изменением энергии тела, имеющего дислокации / Л.И. Гурский // Пластическая деформация и обработка металлов давлением: сб. – Минск: Наука и техника, 1969. – С. 289–296.

References

1. Hill R. *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford, Oxford University Press, 1998. 366 p.
2. Kachanov L.M. *Basics of Theory of Plasticity*. Moscow, Gostechisdat Publ., 1956. 407 p. (in Russian).
3. Van-Bueren H. G. *Imperfection in Crystals*. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1960. 610 p.
4. Urusov V. S., Tauson V. L., Akimov V. V. *Geochemistry of Solid State*. Moscow, GEOS Publ., 1997. 304 p. (in Russian).
5. Kozlova O. G. *Crystal Growth and Morphology*. Moscow, Moscow University Publ., 1972. 304 p. (in Russian).
6. Severdenko V. P., Hurski L.I. *Structure in the Bulk and on the Surface of Rolled Materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 308 p. (in Russian).

7. Novikov I. I., Rosin K. M. *Crystallography and Defects in the Crystal Lattice*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 336 p. (in Russian).
8. Hirth J. P., Lothe J. *Theory of Dislocations*. 2nd ed. Malabar, Krieger Publ. Co., 1982. 862 p.
9. Friedel J. *Dislocations*. Oxford, Pergamon Press, 1964. 512 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-02250-5>
10. Finkel' V. M. *Physics of Destruction*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 376 p. (in Russian).
11. Vladimirov V. I. *Physical Nature of Destruction of Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 280 p. (in Russian).
12. Shishkin A. V., Cherednichenko V. S., Cherepanov A. N., Marusin V. V. *Material Science. Technology of Engineering Materials*. Moscow, Omega L Publ., 2006. 752 p. (in Russian).
13. Severdenko V. P., Tochitskii E. I. *Structure of Thin Metal Films*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 180 p. (in Russian).
14. Severdenko V. P., Hurski L. I. *Rolling with Small Compressions*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 188 p. (in Russian).
15. Severdenko V. P., Hurski L. I., Tochitskii E. I., Chaplanov A. M. Distribution of dislocation density at plastic deformation of metals. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka: sb.* [Metallurgy and Heat Treatment: collection of articles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1965, pp. 49–57 (in Russian).
16. Shtremel M. A., Belyakov B. G. Possibilities of electron-microscopical measurement of dislocation density. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 1968, vol. 25, no. 1, pp. 140–151 (in Russian).
17. Severdenko V. P., Hurski L. I., Tochitskii E. I., Chaplanov A. M. Modification of the dislocation structure of nickel in the process of plastic deformation. *Plastichnost' i obrabotka metallov davleniem: sb.* [Plasticity and Processing of Metals by Pressure: collection of articles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968, pp. 5–12 (in Russian).
18. Hurski L. I. Energy state of dislocations. *Plasticheskaya deformatsiya i obrabotka metallov davleniem: sb.* [Plastic Deformation and Processing of Metals by Pressure: collection of articles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969, pp. 284–288 (in Russian).
19. Hurski L. I. Processes associated with changing the energy of a body having dislocations. *Plasticheskaya deformatsiya i obrabotka metallov davleniem: sb.* [Plastic Deformation and Processing of Metals by Pressure: collection of articles]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969, pp. 289–296 (in Russian).

Информация об авторе

Гурский Леонид Ильич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lhur@bsuir.by

Information about the author

Leonid I. Hurski – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Principal Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lhur@bsuir.by