

УДК 539.4.015.1; 548.24

700-1000°С

, 85, , 308015, , e-mail: kamysh@bsu.edu.ru

. В работе предпринята попытка установить комплексное влияние размеров зерна и созданной дефектной структуры на прочностные характеристики никеля. Дефектная структура, полученная путем одноосного растяжения, интенсивной пластической деформации, исследовалась в зерне, на границе соприкосновения двух зерен и на стыке трех зерен в процессе измерения микротвердости и последующих отжигов.

: микроструктура, микротвёрдость, зерно, пластическая деформация.

1. . В физике прочности установлены закономерности влияния размеров зерна поликристаллических материалов на механические свойства, в частности, на их пластические и прочностные характеристики, что было доказано многочисленными экспериментальными исследованиями и теоретическими обоснованиями.

Наблюдаемые закономерности сводятся к выполнению, например, предела текучести в известном математическом соотношении:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (4.1)$$

где σ – предел текучести; d – размер зерна; σ_0 и k – параметры материала. Авторство этого соотношения принадлежит Холлу и Петчу [1,2]. Соотношение (1) выполняется в широком интервале размера зерна от 10^{-8} до 10^{-2} м и при различных степенях деформации вплоть до разрушения.

К настоящему времени достигнуты большие успехи в получении материалов с различными размерами зерен, влияющих на σ_0 и k и зависящих от типа материала (металл или сплав), текстуры, наличия сегрегаций или выделений на границе зерен и т.д. Изменение размера зерна приводит к изменению его дефектной структуры, а в приграничной зоне – внутреннего напряжения, механизмов деформации и источников дислокаций и др. [3,4].

Процесс пластического течения кристаллов сопровождается непрерывным изменением плотности структурных факторов. Происходит сложный процесс деформационного упрочнения и разупрочнения (динамический возврат), обусловленный неустойчивостью дефектной структуры и стремлением системы к минимуму внутренней энергии.

Хотя деформационное упрочнение и разупрочнение в основном обусловлены междислокационными взаимодействиями, между ними имеется принципиальное различие:

первое является атермическим, второе – термоактивируемым процессами. Их относительный вклад в динамику и кинетику деформации зависит от многих факторов, но основными являются степень деформации, плотность дефектов, скорость и температура деформации и др. Меняются и размеры самих зерен в процессе деформации.

Как правило, исследователи ограничиваются попытками связать изменения прочностных характеристик с размерами зерна (соотношение Холла-Петча) без учета всех физических процессов, протекающих в объеме и на границах соприкосновения зерен.

Сказанное выше свидетельствует о том, что для понимания процессов в пластически деформированных зернах никеля, подвергнутых последующему отжигу, нужна более полная информация о поведении размеров зерна и дефектной структуры в результате действия растяжения и концентрированной нагрузки.

2. . В качестве объекта исследования в работе был выбран технически чистый никель, химический состав которого представлен в табл. 1.

На электроэрозионном станке «Sodick AQ300L» вырезались образцы в виде лопаток с шириной рабочей части 2 мм и длиной 12 мм для определения механических характеристик на универсальной испытательной машине «Instron 5882» на статическое растяжение со скоростью нагружения 1,5 мм/мин. Для снятия дефектного слоя полученные образцы подвергались механической шлифовке и полировке. Измерение микротвердости образцов выполнялось микротвердомером «DM-8B» с использованием пирамидки Виккерса с нагрузкой на индентор 50 г.

1.

Химический состав, %																		
Ni	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Fe	Co	Ti	Al	Nb	W	V	C	S	Hf	Mg	Ta	Zr
99,7000	0,0520	0,0530	0,0074	0,0050	0,0025	0,0050	0,0020	0,0020	0,0050	0,0812	0,0200	0,0020	0,0456	0,0040	0,0200	0,0157	0,0500	0,0020

Отжиг образцов производился в вакуумной печи «СНВЭ 131/14» с остаточным давлением не ниже 10^{-5} Па при температурах 700 - 1000⁰С в течение 60 минут с последующим медленным охлаждением с печью со скоростью ~ 1.8 гр/мин.

Для выделения границ зерен никелевые образцы подвергались химическому травлению в концентрированной кислоте HNO₃. Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью микроскопа «OLYMPUS G71». Определение средних размеров зерен было выполнено методом «случайных секущих».

3. . Отожженный при 700-800 °С никель имеет более однородные по размерам зерна в отличии от размеров зерен после отжига в диапазоне 900-1000⁰С температур, когда никель имеет существенно разноразмерную структуру (рис. 1).

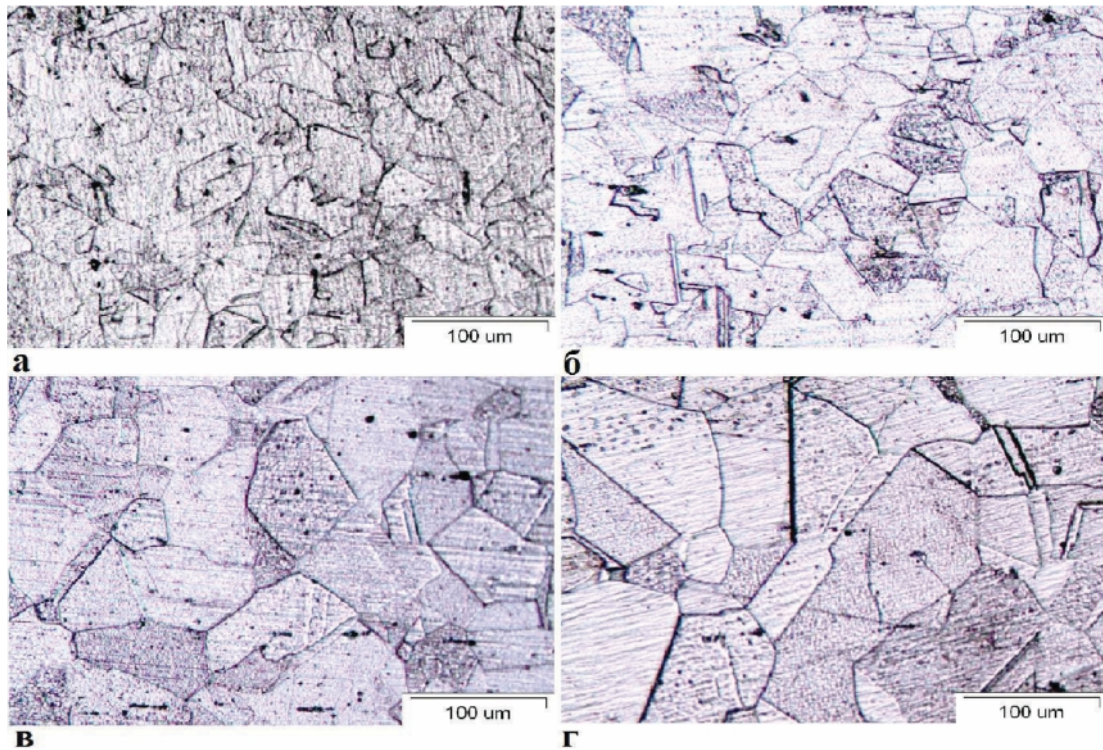


Рис. 1. Структура зерна никеля после отжига: при 700°C – а; отжиг при 800°C – б; отжиг при 900°C – в; отжиг при 1000 °C – г.

2.

t, °C	Микротвердость, Нv 0,05			d, мкм	σ _{0.2} , МПа	k ₁ , МПа/мкм ^{-1/2} ()	k ₂ , МПа/мкм ^{-1/2} ()		
700	152	159	161	37,68	157,94	0,233	4,55	4,96	5,09
800	139	141	147	42,21	126,93	0,045	3,98	4,11	4,49
900	120	125	131	69,01	120,31	0,003	3,54	3,95	4,44
1000	112	119	128	78,52	108,99	-0,096	3,08	3,69	4,47

В отожженных зернах наблюдаются отдельные дислокации и невысокая в целом плотность дислокаций, в исследуемом диапазоне температур, несущественно уменьшается с повышением температуры отжига вплоть до 1000°C. Области зерен, непосредственно примыкающие к границам, обладают сложной дефектной структурой, где происходит скопление примесей, влияющих на механические свойства никеля. При возрастании размера зерна с повышением температуры плотность дислокаций внутри зерна



уменьшается, а дефектная структура, образованная переместившимися дислокациями и примесями, в приграничной зоне уплотняется [5]. В приграничной зоне зерен локализованы наиболее мощные источники упругих полей, о чем свидетельствуют полученные результаты измерений микротвердости в теле зерна, на границе двух и на стыке трех зерен (табл. 2). Другими словами, изменения микротвердости коррелирует с эволюцией структуры (рис. 2).

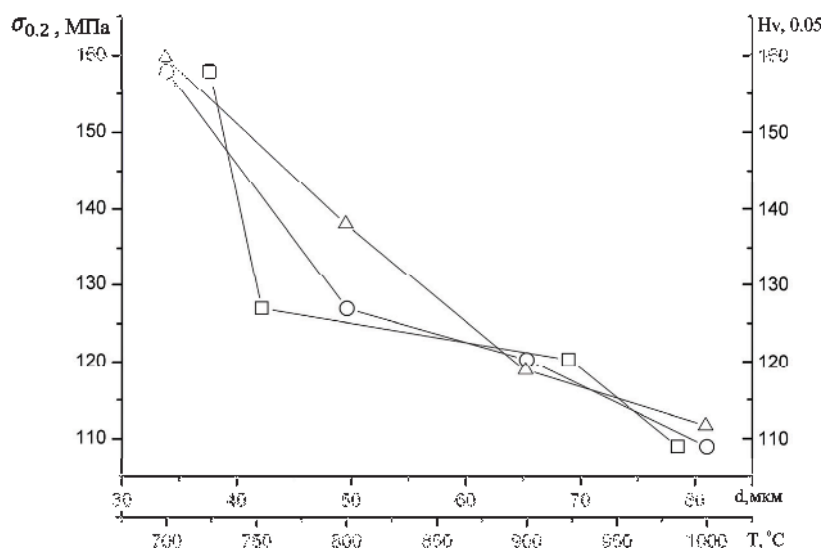


Рис. 2. Зависимости: предела текучести от размера зерна – Δ , предела текучести от температуры отжига – \circ , микротвердости в зерне от температуры отжига – \square .

Во всем исследуемом температурном диапазоне рост зерна приводит к монотонному уменьшению микротвердости в проведенных местах замера в отличие от изменения прочностных характеристик (табл. 2 и рис. 2), спад которых неравномерно зависит как от температуры отжига, так и размера зерна.

Полученные результаты подтверждают непропорциональную температурную зависимость пластических свойств, в отличие от микротвердости, зависимость которой коррелирует с изменением температуры и имеет более плавную кривую спада (рис. 3 и 4). Температурная зависимость микротвердости в местах измерения несущественно отличается друг от друга, что говорит, во-первых, о низкой плотности дислокаций исследуемого никеля, и во-вторых, что механизм развития микротвердости отличается от механизма пластической деформации.

Полученные зависимости свидетельствуют о термически активируемом дислокационном механизме пластической деформации во всем исследуемом диапазоне температур технически чистого никеля.

Изменения величины микротвердости в методах измерения говорят также о различных по величине барьерах, созданных дефектной структурой. Характеристики приграничных прослоек, наряду со структурой самих границ, чрезвычайно важны для формирования механических свойств поликристаллических агрегатов. Активное участие



границ зерен в пластической деформации связано с прохождением части сдвига через границы зерен и с организацией скольжения по границам зерен. Преодоление границ зерен сдвигом и распространение части сдвига из одного зерна в соседнее происходят несколькими механизмами, а именно:

- прохождение нескольких дислокаций через границу зерна;
- генерация дислокаций с границы зерна под воздействием полей напряжений, возникших в соседнем зерне.

Эти процессы в большей мере влияют на пластические свойства, чем на микротвердость.

Перечисленные некоторые из особенностей пластической деформации, связанные со структурой границ, составляют физическую основу зависимости Холла-Петча.

Оценка влияния размеров зерна для изучения особенностей развития свойств, связанных с проблемой Холла-Петча, были изучены на основе зависимостей:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k_1 d^{-1/2}, \quad (4.2)$$

$$H_v = H_0 + k_2 d^{-1/2}, \quad (4.3)$$

где d – средний размер зерна поликристаллического никеля; H_0 – микротвердость монокристаллического никеля; σ_0 – предел текучести монокристаллического никеля; k_1 и k_2 – коэффициенты.

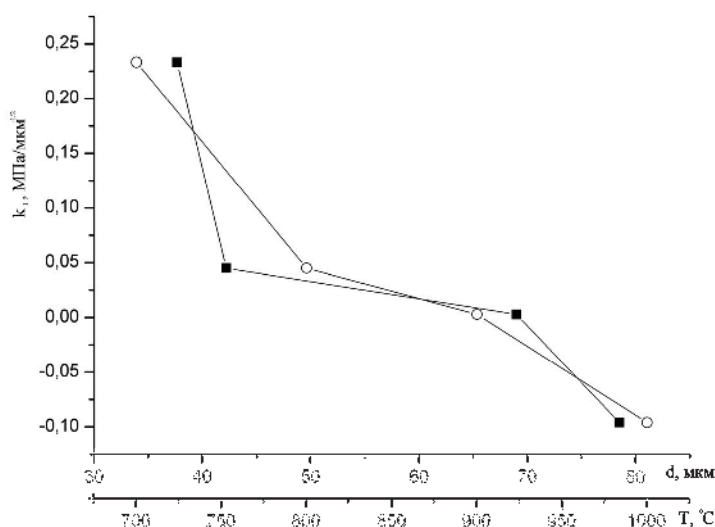


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_1 по результатам измерения предела текучести: от размера зерна – ■, от температуры – ○.

Не пропорциональное изменение величины коэффициента k_1 от размера зерна (рис. 3) и от повышения температуры, связывается с облегченными условиями развития внутривульренного скольжения.



Коэффициент k_2 коррелирует с аналогичной зависимостью k_1 в зерне (рис. 4) и с температурной зависимостью (рис. 5). На границе двух зерен эти зависимости заметно отличаются от внутризеренных зависимостей, что говорит об изменении механизмов процессов, протекающих на границе двух зерен. Что касается поведения k_2 на границе стыка трех зерен, температура и величина зерна не оказывает заметного влияния на изменение коэффициента k_2 . Очевидно благоприятных условий для образования зернограничного проскальзывания при воздействии внешнего напряжения, созданного нагрузкой на индентор микротвердомера, нет.

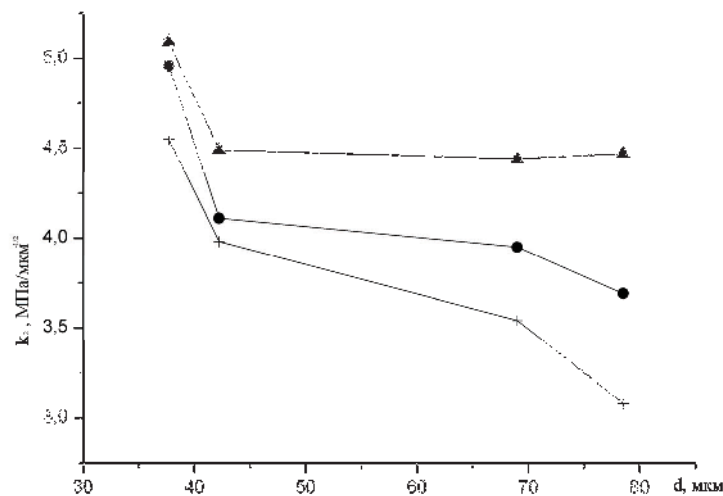


Рис. 4. Зависимость коэффициента k_2 от размера зерна по результатам измерения микротвердости: в зерне – +, на границе двух зерен – •, на стыке трех зерен – ▲.

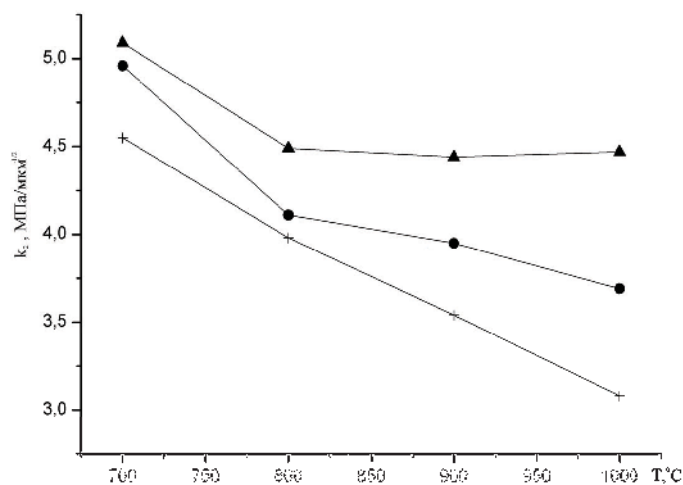


Рис. 5. Зависимость коэффициента k_2 от температуры по результатам измерения микротвердости: в зерне – +, на границе двух зерен – •, на стыке трех зерен – ▲.



Таким образом, полученные результаты исследования позволяют утверждать:

1. В основе пластической деформации растяжением главную роль играют термические механизмы, способствующие развитию деформационного скольжения.
2. В развитии процесса деформирования при интенсивном индентировании основную роль играют механизмы, связанные с преодолением дислокациями препятствий на границе двух зерен и на стыке трех зерен, механизмы которых отличны от механизма деформации растяжением.
3. Коэффициенты Холла-Петча в математическом выражении пластических свойств $\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k_1 d^{-1/2}$ и микротвердости $H_v = H_0 + k_1 d^{-1/2}$ отличаются величиной, что связывается с различными механизмами протекающих процессов.
4. Развитие пластической деформации, полученной в процессе растяжения или интенсивного воздействия на индентор микротвердомера, укладывается в математическое соотношение Холла-Петча.

Работа выполнена в центре коллективного пользования НИУ «БелГУ» и в ННЦ ХФТИ АН, Украина в соответствии с договором между НИУ «БелГУ» и ННЦ ХФТИ.

1. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel. III. Discussion of results // Proc. Phys. Soc. – 1957. – 64B. – R.747-753.
2. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel Inst. – 1954. – 174. – R.25-28.
3. Конева Н.А., Жданов А.Н., Козлов Э.В. Физические причины высокой прочности ультрамелкозернистых материалов // Изв. РАН, серия физическая. – 2006. – 70;4. – С.582-585.
4. Козлов Э.В., Жданов А.Н., Конева Н.А. Измельчение размера зерна как основной ресурс повышения предела текучести // Вестник Тамбовского университета. – 2003. – 8;4. – С.509-513.
5. Конева Н.А., Жуковский С.П., Лапскер И.А. и др. роль внутренних поверхностей раздела в формировании дислокационной структуры и механических свойств в однофазных поликристаллах // Физика дефектов поверхностных слоев материалов / Под ред. А.Е. Романова Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1989. – С.113-131.

HALL-PETCH'S PROPORTION IN DESCRIBING THE STRESS LIMIT AND MICROHARDNESS OF TECHNICALLY PURE NICKEL SUBJECTED TO ANNEALING IN THE RANGE 700-1000°C

N.V. Kamyshanchenko, A.V. Galtsev, O.A.

Pecherina

Belgorod State

University,

Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail:

kamysh@bsu.edu.ru



Abstract. Complex influence of grain sizes and defect structure generated by it on Ni hardness characteristics is found. The defect structure obtained by one axes tension and intensive plastic deformation is investigated in grain, on the touch boundary of two grains and on the junction of three grains during the process of microsolidity measurement and posterior anneals.

Key words: microstructure, microsolidity, grain, plastic deformation.