

Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев (Белгородский государственный университет),
И.М. Неклюдов (Национальный научный центр Харьковского технологического института)

Сравнительные характеристики эффекта Баушингера в зависимости от исходного состояния структуры никеля

Изучение влияния эффекта Баушингера и связанных с ним технологических способов подавления воздействия эффекта на физико-механические свойства металлов были и остаются актуальными. Сделана попытка показать, что создание оптимального структурного и энергетического состояния в исследуемом металле с помощью предложенной методики обработки может существенно уменьшить влияние эффекта Баушингера на механические характеристики, долговечность и энергетические параметры исследуемого никеля сравнительно высокой чистоты при низкочастотном знакопеременном изгибе с фиксированным радиусом огибания при комнатной температуре.

The study of the Bauschinger's effect and connected with it technological methods of suppression of its influence on physical and mechanical metal properties has been and still remains actual. The attempt to show that the creation of the optimal structural and energy state in the explored metal with the help of the proposed method of treatment can substantially decrease the influence of Bauschinger's effect on the mechanical characteristics, durability and energy parameter of the studied nickel of comparatively high purity under the low-frequency alternate bend with the fixed bending radius under the room temperature is presented.

Введение

К настоящему времени эффект Баушингера (снижение пределов пропорциональности, упругости и текучести материалов в результате изменения знака нагружения, если первоначальная нагрузка вызвала наличие пластических деформаций) обнаружен практически у всех исследованных кристаллических тел и считается одной из особенностей деформированного состояния материалов. К изучению его физической природы постоянно возвращаются по мере накопления новых данных об этом явлении и представлений о процессе пластической деформации кристаллов. Интерес к исследованиям эффекта Баушингера определяется многими причинами. Во-первых, исследования особенностей знакопеременного деформирования и физической природы эффекта Баушингера дает важные сведения о микронапряжениях, возникающих при деформациях, микромеханизмах пластической деформации и упрочнения кристаллических тел. Экспериментально подтверждено, что деформационное упрочнение и эффект Баушингера внутренне связаны.

Во-вторых, по характеру изменения деформации материала за один цикл знакопеременного нагружения с определенной амплитудой в некоторых случаях можно судить о взаимосвязи деформации за первый цикл и числа циклов до разрушения [1, 2], т.е. прогнозировать долговечность материалов в области малоциклового усталости. Выяснение особенностей процессов, протекающих в реальных условиях эксплуата-

ции, всегда было актуальным в механике твердого тела [2]. И, наконец, наличие эффекта Баушингера приходится учитывать при эксплуатации изделий, изготовленных из многослойных наклепанных материалов.

Методика проведения эксперимента

Образцы из никеля (чистотой 99,997 %) в виде полосы вырезали из листа вдоль проката размером 50×10×1,5 мм и подвергали отжигу при температуре 1073 К в течение 60 мин в вакууме не ниже 10⁻³ мм рт. ст. с последующим остыванием с печью. Эти образцы составили первую исследовательскую партию после отжига. Вторую партию образцов после отжига подвергали закалке от 1373 К в воду с последующим погружением в сосуд Дьюара с жидким азотом до начала проведения эксперимента. Третью партию отожженных образцов закаливали, деформировали с остаточной деформацией до 2 % с последующим старением под напряжением при $\sigma_n = 0,5\sigma_{0,2}$ и комнатной температуре в течение 60 мин. Образцы всех трех партий подвергали огибающей повторно-переменной деформации на цилиндрическом приспособлении с радиусом обжатия 35 мм (угол обжатия 180°).

Результаты эксперимента

Известно, что в процессе деформации часть энергии расходуется на преодоление внутреннего энергетического состояния кристаллической структуры, но

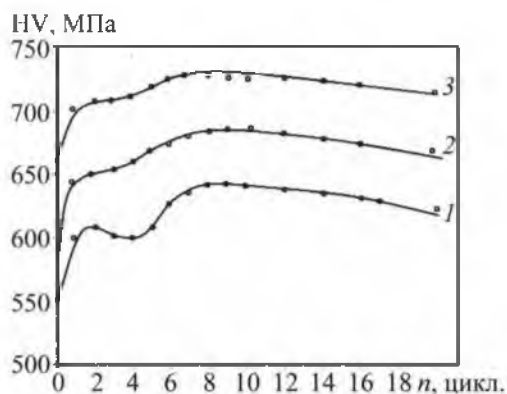


Рис. 1. Зависимость микротвердости HV от числа циклов n (температура исследования – 300 К): 1 – образцы первой партии; 2 – образцы второй партии; 3 – образцы третьей партии

большая часть превращается в тепло. Количество запасенной энергии зависит от условий деформации, размера зерна, степени деформации и др. [3, 4]. При знакопеременном нагружении площадь образовавшейся механической гистерезисной петли равна энергии ΔW , рассеянной в единице объема за один цикл нагружения [5].

Развитие усталостных процессов сопровождается изменением микротвердости материалов (рис. 1), ростом предела текучести (рис. 2) и уменьшением доли энергии, запасенной в металле (табл. 1 и 2).

Проведенные исследования на никеле сравнительно высокой чистоты показали взаимосвязь энергетических параметров, исходного внутреннего состояния и условий знакопеременного деформационного воздействия: радиуса изгиба, числа циклов и способа циклического нагружения. В частности, было установлено, что запасенная энергия при комнатной температуре уменьшается с увеличением числа циклов и радиуса изгиба R (см. табл. 1).

Абсолютное изменение площади петли гистерезиса для образцов:

$$\Delta S_{1,2} = S_1 - S_2;$$

$$\Delta S_{1,3} = S_1 - S_3,$$

где $S_1 \dots S_3$ – площади петель гистерезиса образцов соответствующих партий 1–3.

Относительное изменение площади петли гистерезиса, %:

$$\varepsilon_{s1,2} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} 100;$$

$$\varepsilon_{s1,3} = \frac{S_1 - S_3}{S_1} 100.$$

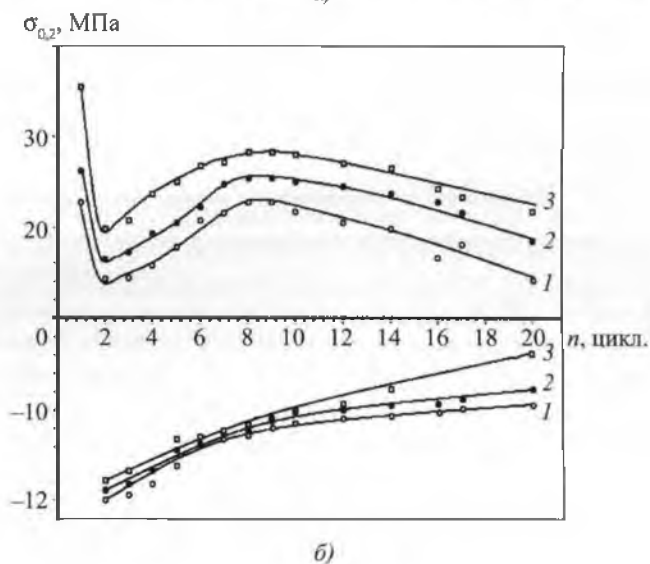
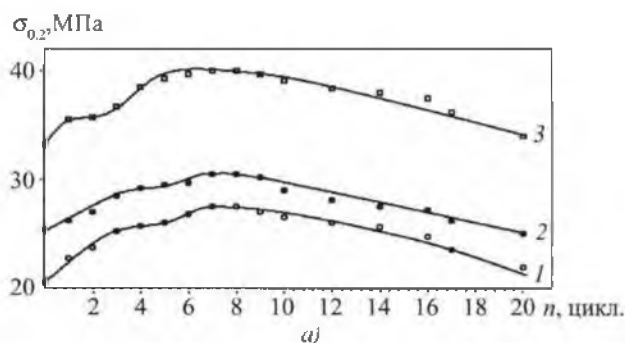


Рис. 2. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ от исходного состояния структуры образцов никеля при знакопеременном нагружении и числа циклов n :

а – при полуцикловом нагружении; б – верхнее и нижнее значения $\sigma_{0,2}$ механического гистерезиса; 1 – исходное состояние; 2 – закалка от температуры 1100 °С; 3 – закалка от температуры 1100 °С с последующим деформированием

Экспериментальные результаты показали, что подавление эффекта Баушингера зависит от условий нагружения. Так, при двустороннем изгибе на ширину петли влияют исходное состояние, число циклов и радиус изгиба при выбранной температуре исследования (табл. 2–4).

Абсолютное $\Delta I_{1,2}$, $\Delta I_{1,3}$ и относительное $\varepsilon_{i1,2}$, $\varepsilon_{i1,3}$ изменения ширины петли гистерезиса определяются аналогично изменениям площади петли.

Анализ экспериментальных данных

Ранние исследования эффекта Баушингера установили, что запасенная энергия зависит от температуры испытания [4]. Обнаруженные зависимости хорошо согласуются с результатами исследования влияния

Таблица 1

Площадь петли механического гистерезиса S , мм², при полном цикле огибания по цилиндрической поверхности

Число циклов	Площадь петли S , при значениях радиуса R , мм				
	15	20	25	30	35
7	15,30/13,50/12,00	14,75/13,00/11,30	14,00/12,35/10,70	13,50/11,80/9,80	12,70/11,00/9,00
10	13,00/11,50/9,30	11,50/10,10/8,70	10,50/9,40/8,00	10,00/9,30/7,70	9,50/8,70/7,20
17	6,50/5,00/4,50	6,00/4,60/3,80	5,70/4,00/3,30	5,00/3,50/3,00	3,00/2,50/2,00

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Таблица 2

Ширина петли механического гистерезиса l , мм, при полном цикле огибания по цилиндрической поверхности

Число циклов	Ширина петли l при значениях радиуса R , мм				
	15	20	25	30	35
7	0,70/0,60/0,53	0,63/0,53/0,50	0,57/0,50/0,45	0,53/0,47/0,41	0,51/0,42/0,38
10	0,42/0,40/0,35	0,40/0,38/0,35	0,35/0,31/0,28	0,31/0,27/0,22	0,33/0,27/0,22
17	0,34/0,30/0,38	0,30/0,28/0,24	0,27/0,22/0,20	0,23/0,20/0,21	0,24/0,22/0,18

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Таблица 3

Абсолютные и относительные изменения площади петли механического гистерезиса в зависимости от условий нагружений ($R = 35$ мм) и числа циклов

Число циклов	$\Delta S_{1,2}$, мм ²	$\Delta S_{1,3}$, мм ²	$\varepsilon_{s1,2}$, %	$\varepsilon_{s1,3}$, %
7	2,0/1,7	4,0/3,7	16,7/13,3	33,3/29,1
10	0,3/0,8	2,8/2,3	4,1/8,1	38,4/24,2
17	0,5/0,5	0,2/1,0	13,3/16,6	23,3/33,3

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие одностороннему и двустороннему нагружению.

Таблица 4

Абсолютное и относительное изменение ширины петли механического гистерезиса в зависимости от условий нагружения ($R = 35$ мм) и числа циклов

Число циклов	$\Delta l_{1,2}$, мм	$\Delta l_{1,3}$, мм	$\varepsilon_{l1,2}$, %	$\varepsilon_{l1,3}$, %
7	0,20/0,09	0,29/0,13	28,60/17,60	41,40/25,50
10	0,06/0,06	0,05/0,11	14,30/18,10	14,30/33,30
17	0,03/0,02	0,10/0,06	0,20/8,33	0,40/25,00

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие одностороннему и двустороннему нагружению.

температуры на кривую "напряжение—деформация". На основании данных был сделан вывод о том, что при данной степени деформации при низкой температуре остается больше дислокаций, чем при комнатной температуре.

Результаты исследования никеля также показывают, что запасенная энергия возрастает с увеличением степени деформации (см. табл. 3). При таких условиях эксперимента аннигиляция дислокаций происходит более интенсивно с ростом степени деформации [3]. Однако по абсолютным значениям итоговые результаты исследования деформированного никеля (число циклов, степень деформации) отличаются от приведенных в литературных источниках [3, 6].

Было замечено, что запасенная энергия при одних и тех же итоговых параметрах зависит от исходного внутреннего состояния исследуемого никеля (см. табл. 4). Поскольку гистерезисное внутреннее напряжение не зависит от частоты колебаний и более чувствительно к амплитуде напряжения [7], то можно ожидать, что с ростом последней ширина петли гистерезиса будет возрастать. В проведенном исследовании ширина гистерезисной петли существенно уменьшается в сравнении со второй и особенно первой партиями, то можно утверждать, что в деформационно-состаренном никеле процессы протекают при более низких значениях амплитуды напряжения. Особенно это заметно при двустороннем циклическом нагружении в сравнении с односторонним.

Известно, что при обратном знакопеременном нагружении происходит изменение направления движений дислокаций, которым приходится преодолевать кроме препятствий прямого движения еще и вновь образовавшиеся барьеры в процессе первого деформационного изгиба. При этом напряжения от образовавшихся скоплений дислокаций возрастают, приводят к более интенсивному их взаимодействию. Все это способствует увеличению запасенной энергии, что и отражается на площади и ширине петли гистерезиса на первых циклах знакопеременного нагружения.

Последующие приложения внешних нагрузок в противоположном направлении, совпадающем с направлением напряжения от скопления дислокаций, вызывает дальнейшую аннигиляцию дислокаций и стягивание петель [8–10].

Наблюдаемая зависимость скорости изменения эффекта Баушингера от исходного состояния структуры металла, очевидно, связана с возможностью образования стадии легкого скольжения дислокаций в структуре кристалла. Если предположить, что на стадии легкого скольжения длина свободного пробега не зависит от степени деформации, а число движущихся дислокаций в первичных плоскостях пропорциональ-

но приложенному напряжению, то зависимость между эффектом Баушингера и степенью упрочнения носила бы линейный характер. На практике же наблюдается непропорциональная зависимость для всех трех партий образцов. Кроме того, эта непропорциональность отличается и абсолютными величинами приращения механических параметров.

Для образцов первой партии отжиг при высокой температуре существенно уменьшает количество дефектов в объеме кристалла, которые являются барьерами для перемещения дислокаций в результате воздействия внешних напряжений. Из всех предложенных схем размножения дислокаций наиболее распространенной является классическая модель источника Франка—Рида, согласно которой дислокационные сегменты по достижению критического напряжения могут испускать неограниченное количество дислокационных петель [9, 11]. Испущенная источником дислокационная петля распространяется в плоскостях скольжения и выходит на границу раздела или задерживается перед препятствиями, например, у границ зерна, блока, у барьера Ломера—Котрелла. В последнем случае дислокация будет отталкивать другие петли, испущенные источником вслед за ней под действием приложенного напряжения. Эти петли будут скапливаться за первой петлей, располагаясь на некоторых расстояниях друг от друга.

После снятия внешней нагрузки под действием внутреннего напряжения "тыльные" дислокации начинают двигаться к первичному источнику и аннигилировать с дислокациями противоположного знака. Обратное движение дислокаций при снятии нагрузки создает условие для образования петли гистерезиса.

Сравнивая экспериментальные данные изменения механических параметров при одностороннем и полном изгибе образцов в начальный период знакопеременного нагружения, можно предположить, что наблюдаемое изменение, например, предела текучести, связано с низкой плотностью дефектов в отожженных образцах первой партии. Увеличение числа циклов знакопеременного нагружения приводит к росту числа дислокаций обратного течения. Вследствие блокировки первичных дислокаций и вынужденного перехода некоторых из них скольжением в плоскости других систем ширина петли гистерезиса при деформированиях на последующих стадиях кривой упрочнения возрастает медленнее, чем на предыдущих циклах [12]. Такая закономерность уменьшения прироста предела текучести на каждой последующей степени деформации, кроме того, связана с сокращением петель дислокации, скопившихся у препятствий при обратном течении [12].

Поскольку в исследуемом никеле примесных атомов мало, то для создания исходной дефектной

структуры в объеме кристалла была использована закалка от высоких температур. Закалочные вакансии и их комплексы (партия 2), как и атомы примеси, оказывают заметное влияние на подавление эффекта Баушингера, поскольку они, взаимодействуя с дислокациями, способствуют образованию стопоров для движущихся дислокаций, атмосфер вокруг дислокаций. Образовавшаяся дефектная структура активизирует появление поперечного скольжения. В начальный период знакопеременного нагружения при высокой концентрации вакансий и их комплексов эти процессы проявляют свою активность при первом изгибе. Изгиб в противоположном направлении (эффект Баушингера) существенно влияет на предел текучести. С уменьшением плотности закалочных дефектов в результате последующих знакопеременных деформационных нагружений эффект снижается и происходит рост предела текучести (см. рис. 2, б). Заметное подавление эффекта Баушингера проявляется в образцах третьей партии.

В реальных кристаллах имеется целый спектр "слабых" мест, отличающихся значениями критических напряжений. При самых незначительных внешних нагрузках в этих местах создаются большие локальные напряжения, сравнимые с критическими напряжениями работы источников дислокаций. Под действием внешней нагрузки в перенапряженных местах еще до достижения макроскопического предела текучести протекают процессы, связанные с зарождением и смещением дислокаций, что приводит к релаксации напряжений и стабилизации структуры в этих местах.

Для повышения сопротивления деформированных кристаллов без изменения их химического состава предложены различные способы термомеханической обработки. Многие прочностные характеристики металлов и сплавов, подвергнутых термомеханическому воздействию, получены без учета процессов релаксации напряжения, восстановления сплошности материала, которые влияют на повышение сопротивления деформированию. Особый интерес представляют методы диффузионного упрочнения, которые не связаны с применением больших деформаций. Упрочнение при этом происходит благодаря перераспределению дефектов и релаксации локальных перенапряжений в объеме материала.

Истощение подвижных дислокаций в кристаллах достигается не только их аннигиляцией и выходом на поверхность, но и закреплением их точечными дефектами и комплексами из них. Термическая и механическая активация диффузионных и микросдвиговых механизмов релаксации локальных перенапряжений способствуют установлению более однородной,

теоретически равновесной структуры металлов [13–17].

Во многих исследованиях было показано, что отжиг под напряжением предварительно деформированных материалов при определенной температуре изменяет предел текучести и уменьшает эффект Баушингера [18–22]. Снижение эффекта Баушингера после отжига является следствием релаксации внутренних напряжений и закрепления дислокаций точечными дефектами. Однако для получения необходимого результата требуются большие деформации, что затрудняет их практическое применение. Методы, предусматривающие малые степени деформации, создают наиболее устойчивую структуру за счет закрепления дислокаций точечными дефектами и особенно примесными атомами значительной концентрации.

Для очень чистых металлов применение описанных методов дает незначительный эффект из-за малой концентрации примесных атомов. Повышение прочностных характеристик металлов достигается путем сочетания закалки металлов от высоких температур и дальнейшей механико-термической обработки, заключающейся в деформировании в макроупругой области при оптимальной температуре с последующим отжигом под напряжением, не превышающим предела текучести, при температуре ниже температуры рекристаллизации.

За меру эффекта Баушингера было применено следующее отношение [23, 24]:

$$\beta = \frac{\sigma_s - \sigma'_s}{\sigma'_s}$$

где σ_s – предел текучести при повторном деформировании в первоначальном направлении;

σ'_s – предел текучести при повторном деформировании в обратном направлении. Расчетные данные приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительные характеристики эффекта Баушингера

Число циклов	σ_s , МПа	σ'_s , МПа	β
7	21,50/24,75/27,25	-10,65/-10,56/-10,45	1,02/1,34/1,61
10	21,75/25,00/28,00	-9,75/-10,05/-10,25	1,23/1,49/1,73
14	19,00/21,50/23,25	-8,85/-9,75/-9,85	1,14/1,40/1,61

Примечание. Через косую черту даны значения, соответствующие номеру партии 1–3.

Заключение

Полученные результаты дают возможность утверждать, что деформационное старение предварительно закаленных образцов никеля позволяет существенно уменьшить влияние эффекта Баушингера на механические свойства исследуемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Сб. Усталость металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1966. 321 с.
2. Сереев С.В. Прочность при малом числе циклов нагружения. М.: Наука, 1969. С. 9.
3. Ticher A.L., Bever M.B. T.A.I.M.E. 1959. P. 215, 326.
4. Buckley S.N., Entwistle K.M. Acta Met. 1956. V. 4. P. 352.
5. Кеннеди Д.Д. Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965. 312 с.
6. Мак Линн Д. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965. С. 162–164.
7. Roberts J.M., Hartman D.E. Trans. Met. Soc. AIME. 1964. V. 230. P. 1125.
8. Wooley R.W. Phil. Mag. 1953. V. 44. P. 597.
9. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 282 с.
10. Зеерер А. Дислокации и механические свойства кристаллов. М.: Инстр. лит-ра, 1969. С. 179.
11. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 644 с.
12. Strutt P.R., Kear V.H., Wilsdorf H.G.F. Acta Met. 1966. V. 14. P. 611–619.

13. Гарбер С.В., Неклюдов И.М., Перунина Л.М. Упрочнение висмута при программном нагружении. Физика металлов и металловедение. 1961. № 1. С. 108–111.

14. Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Физические основы программного нагружения металлов. К.: Наукова думка, 1975. 175 с.

15. Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В. Физические представления о путях повышения прочности кристаллических тел / Сб. "Исследование механического сопротивления материалов и конструкций": тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева и БТИСМ им. И.А. Гришманова. М. Т. 5. Вып. 20. С. 80–114.

16. А.с. 692904 СССР, МКЛ² С22А 1/00. Способ термомеханической обработки металлов / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, В.В. Слезов, Н.В. Камышанченко. 1979.

17. А.с. 378532 СССР, МКЛ С 221 1/00. Способ термомеханической обработки чистых металлов / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, И.И. Бобонец, Н.В. Камышанченко. 1973.

18. Fanche W., Stalte E., Kugler T. Techn. Mitt. Krupp. 1965. Vol. 23. P. 117.

19. Saks G., Shoji H. Zeitschr fur Physik, 1927. Vol. 45. P. 776.

20. Махутов Н.А., Щербак А.М., Пойда В.Г., Терентьев В.Ф. Проблемы прочности. 1969. № 5. С. 59.

21. Wilson D.V., Ogran G.R. J. Iron a Steel Inst. 1968. Vol. 206. No. 9.

22. Грачев С.В., Григорьева В.Н. 1970. ФММ. Т. 30. С. 819.

23. Талыков Г.Б. Пластичность и прочность стали при сложных нагрузках. Л.: изд-во ЛГУ, 1968. 182 с.

24. Fanche W., Stalte E., Kugler T. Techn. Mitt. Krupp. 1965. Vol. 23. P. 117.

ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.

Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (Библиотека технолога).

М.: Машиностроение, 2004. 688 с.: ил.

Цена с НДС 253 р.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса статико-импульсной обработки пластическим деформированием и рекомендации по выбору режимов обработки. Рассмотрены особенности импульсного нагружения очага деформации и конструкции экспериментальных стенов и оборудования.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, научно-исследовательских институтов, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.