

с покрытиями TiSiAlN в зависимости от содержания второго легирующего элемента (алюминия). Видно, что легирование покрытия TiSiN алюминием приводит к изменению напряженного состояния режущего клина инструмента. Нанесение таких покрытий по сравнению с покрытием TiSiN уменьшает напряжения  $\sigma_x$  и смещает изобары напряжений в сторону от задней поверхности и режущей кромки. Аналогичное снижение напряжений и смещение их изобар наблюдается для всех двухэлементных покрытий при их легировании. Максимальные значения напряжений  $\sigma_{x \max}$  наблюдаются на середине контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента. Наибольшее снижение напряжений в режущем клине инструмента вызывает нанесение покрытий, легированных алюминием, кремнием и цирконием (на 6...10 %), меньшее – хромом, железом и молибденом.

## Вывод

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальные тепловое и напряженное состояния режущего клина инструмента обеспечивают двухэлементные покрытия, легированные алюминием, кремнием и цирконием. Полученные данные позволяют сделать предположение, что нанесение трехэлементных покрытий будет способствовать повышению работоспособности твердосплавного инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
2. Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.Н. Ларин и др. / Под редакцией Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.

Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев (Белгородский государственный университет, Россия),  
И.М. Неклюдов (НИЦ ХФТИ, Украина)

## Влияние деформационного старения на структурное и поверхностное состояния никеля высокой чистоты

*Известно, что предел текучести и микротвердость при знакопеременном нагружении зависят от наличия и концентрации подвижных дислокаций. Проявление эффекта Баушингера зависит от структурного состояния исследуемого никеля Н0. Исследовали три партии образцов: первая – отожженные, вторая – закаленные от предплавленной температуры, третья – подвергнутые деформационному старению под напряжением после закалки. Образцы подвергали циклическому полному знакопеременному изгибному нагружению с постоянной амплитудой. Деформационно состаренные под напряжением образцы отличаются заметным улучшением прочностных и эксплуатационных свойств по сравнению с образцами первых двух партий.*

**Ключевые слова:** деформационное старение, структура, знакопеременное нагружение.

*It is known that the value of the yield stress and microhardness at the alternating loading depends on the availability and concentration of the mobile dislocations. The display of the Bauschinger's effect depends on the structural state of the investigated nickel. We investigated the nickel of the mark H0 of which three lots of samples were prepared. The annealed samples were the first lot, the second lot contains the samples tempered from the under-melting temperature and the third – the samples exposed to the strain ageing under stress after tempering. The samples of the third lot were exposed to the full cyclic alternating bend loading with the constant amplitude. Strain aged under stress samples differ by the evident improving of the strengthening and performance attributes in comparison with the samples of the other two lots.*

**Key words:** strain aging, structure, alternating bending.

## Введение

Первые эксперименты по увеличению предела текучести в металле, не имеющем фазового превращения, были проведены в 50-х гг. прошлого века на цинке при быстром охлаждении с предплавленной температуры. Результаты исследований, полученные Маддином и Коттреллом, Леви и Мецгерем и другими учеными позволили утверждать, что вакансии,

возникшие при закалке, закрепляют дислокации. Последующее старение при эффективной температуре способствует дополнительному упрочнению в результате адсорбции избыточных вакансий на дислокациях или вторичных дефектах, образующихся при конденсации вакансий, или на тех и других.

Сравнение графиков зависимости напряжение–деформация алюминия, нагретого до предплавленной температуры, охлажденного с печью и зака-

ленного от аналогичной температуры в соляной ванне при 273 К, позволило обнаружить существенное расхождение в значениях предела текучести.

Деформирование отожженных и закаленных образцов позволило установить, что процесс деформационного упрочнения в этих образцах протекает идентично и отличается только скоростью упрочнения.

При знакопеременном циклическом нагружении обнаружено дополнительное интенсивное образование линий скольжения, которые при последующих знакопеременных нагружениях разрастаются в полосы скольжения. Зависимость напряжение–деформация для закаленных образцов при этом совпадает с аналогичной зависимостью для отожженных образцов. Такое совпадение возможно в том случае, если в закаленных и отожженных образцах процесс скольжения начинается одновременно. Возникновение и дальнейшее развитие полос скольжения под действием знакопеременного нагружения затем обычно способствуют развитию трещин. Следовательно, усталостные полосы скольжения, способствующие образованию трещин, начинаются в равных условиях, но металл отличается исходным структурным состоянием.

Цель данной работы – исследование структурного состояния ГЦК-металлов, которое позволит при равных термомеханических условиях уменьшить вероятность образования трещин.

### Методика, материалы и оборудование

Образцы размером 50×10×1,5 мм вырезали из полосы никеля Н0 с чистотой 99,998 % вдоль направления прокатки. Образцы первой партии отжигали при температуре 1273 К в течение 60 мин в вакууме не ниже 0,13 Па и остужали вместе с печью до комнатной температуры.

Вторую партию образцов подвергали дополнительной закалке от температуры 1373 К в воду. Образцы третьей партии после закалки деформировали растяжением с остаточной деформацией около 2 % с последующим старением под напряжением  $\sigma_n = 0,5 \sigma_{0,2}$  при комнатной температуре в течение 120 мин. Все три партии образцов подвергали полному изгибному знакопеременному нагружению вдоль цилиндрической поверхности радиусом 35 мм.

Состояние поверхности исследовали при помощи сканирующего зондового микроскопа Smea–А. Структуру исследовали при помощи оптического микроскопа "ПОЛАМ" с увеличением 170 000. Микротвердость поверхности образцов измеряли микротвердомером ПМТ-3М. Разрыв обработанных образцов производили при температуре 77 К.

### Результаты эксперимента

Условия упрочнения при знакопеременном изгибе вдоль цилиндрической поверхности с фиксированным радиусом и зашпеченным одним концом образца отличаются от условий упрочнения при сдвиге, растяжении или сжатии. Прежде всего при изгибе упрочнение развивается достаточно быстро в начале деформации. Дальнейшее охватывающее огибание образца вдоль цилиндрической поверхности с постоянной скоростью создает условие для перемещения существующих и вновь образованных дислокаций равномерно до второго его свободного конца.

Значения остаточной деформации при изгибе позволяют утверждать, что воздействие на структуру исследуемых образцов происходит при больших амплитудах напряжения (см. таблицу).

Для всех трех партий образцов характерны следующие особенности изменения предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и микротвердости *HV* при знакопеременном деформационном нагружении.

Изменение  $\sigma_{0,2}$  с увеличением *n* имеет сложную зависимость для всех трех партий:

- на первом этапе знакопеременного нагружения (в пределах 1...4 циклов) наблюдается резкий спад  $\sigma_{0,2}$ ;

- с последующим ростом *n*  $\sigma_{0,2}$  интенсивно возрастает, затем происходит уменьшение скорости прироста и при 8...10 циклах достигает максимального значения;

- дальнейшее знакопеременное нагружение отличается разупрочнением, предшествующим разрушению.

Во всех партиях образцов скорость прироста текучести различается – большая скорость прироста отмечается в третьей партии и существенно меньшая – во второй и особенно в первой партиях.

После достижения максимального значения  $\sigma_{0,2}$  происходит заметный спад во всех трех партиях образцов, но наиболее резкий спад отмечается в первой партии и более сглаженный в третьей (рис. 1).

Закономерность изменения микротвердости идентична изменению предела текучести при полном знакопеременном изгибном нагружении.

Анализ состояния поверхностей, наличие полос и линий скольжения в исследуемом никеле позволяют сделать обобщающий вывод: наличие полос скольжения, плотность линий скольжения и взаимодействие их на границах зерен и с границами зависят от исходного состояния структуры.

Предложенная технологическая обработка образцов (партия 3) позволила снизить влияние эффекта Баушингера на механические характеристики исследуемых образцов.

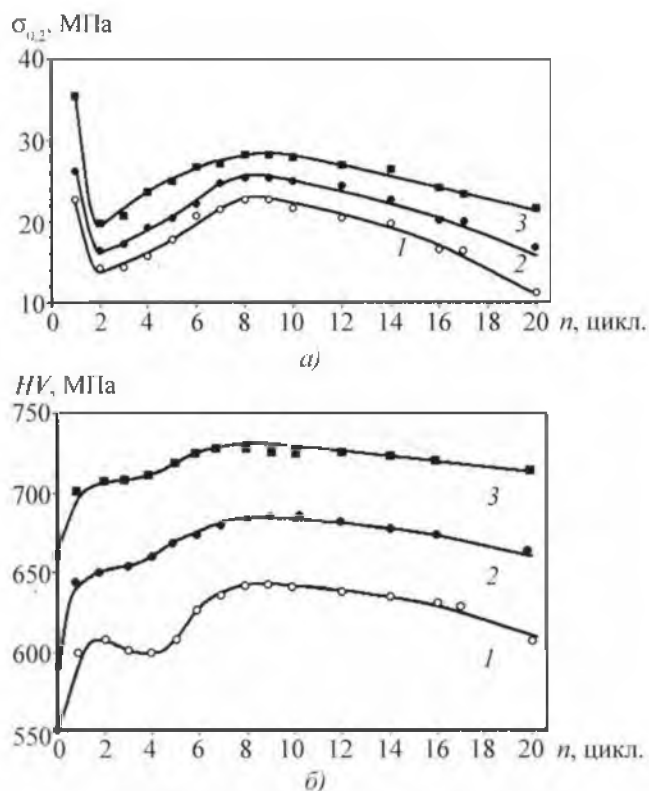


Рис. 1. Зависимости остаточного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а) и твердости  $HV$  (б) исследуемых первой (1), второй (2) и третьей (3) партий образцов никеля при двустороннем знакопеременном изгибном нагружении

дуемого никеля (предел текучести и микротвердость), поперечное скольжение дислокаций обеспечило уменьшение шероховатости поверхности исследуемого никеля.

### Обсуждение результатов

Известно, что в алюминиевых кристаллах возможно увеличение числа циклов нагружения до возникновения трещин в результате покрытия поверхности тонкой оксидной пленкой, предупреждающей развитие поверхностных нарушений. Увеличение долговечности при знакопеременном нагружении может быть достигнуто периодическим отжигом. Обязательным условием проведения отжига является достижение насыщения деформационного упрочнения. Последовательное проведение отжига после каждых 25...30 циклов нагружения позволило предупредить образование интенсивных полос скольжения.

Следовательно, главной причиной развития разрушения металлических изделий в процессе циклического знакопеременного нагружения является образование и интенсивное развитие полос скольжения.

Когда металл подвергали циклическому нагружению, то в отдельных зернах появились тонкие следы скольжения. Число циклов нагружения, необходимое для появления этих заметных следов скольжения, зависит от амплитуды нагружения. Из приведенных данных (см. таблицу) следует, что при выбранных

Параметры механического гистерезиса после знакопеременного изгибного нагружения образцов

n	Партия 1				Партия 2				Партия 3			
	$\sigma_{0,2}^{верх}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ниж}$ , МПа	$\epsilon$ , %	$HV$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{верх}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ниж}$ , МПа	$\epsilon$ , %	$HV$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{верх}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ниж}$ , МПа	$\epsilon$ , %	$HV$ , МПа
2	14,25	12,00	10,10	610	16,50	11,77	9,13	650	19,75	11,55	6,91	710
4	15,75	11,65	10,33	600	19,25	11,35	9,56	660	23,75	11,35	7,15	715
6	20,75	10,78	10,06	627	22,25	10,75	9,84	675	26,75	10,60	7,25	725
8	22,75	10,56	11,03	642	25,50	10,45	10,41	685	28,25	10,34	7,80	730
10	21,75	9,75	11,39	642	25,00	10,05	10,79	685	28,00	10,00	8,17	725
12	20,50	9,55	11,39	638	24,25	10,00	11,02	682	27,50	9,88	8,40	727
14	19,75	9,25	11,81	635	23,00	9,90	11,54	680	26,50	9,55	8,90	721
16	16,65	8,99	12,24	630	21,75	9,88	11,52	673	25,25	8,98	9,19	720
20	16,50	8,78	13,23	608	20,00	9,55	12,17	662	23,75	8,75	9,52	715

Обозначения:  $\sigma_{0,2}^{верх}$ ,  $\sigma_{0,2}^{ниж}$  — соответственно значение предела текучести для  $\sigma_{0,2}$  верхней и нижней частей петли механического гистерезиса при полном нагружении;  $\epsilon$  — остаточная деформация при полном нагружении; n — число циклов знакопеременного изгибного нагружения.

условиях проведения исследований деформационное упрочнение проходит при сравнительно больших деформациях. В ГЦК-структурах скорость упрочнения при больших деформациях зависит в основном от различной ориентации зерен кристаллов.

Все дислокации, движущиеся или неподвижные, действуют совместно и приводят к возникновению поля напряжений, которое изменяется в пространстве и во времени. Подвижные дислокации перемещаются в этом поле напряжений. В некоторых точках поле напряжений помогает движению дислокаций, а в некоторых мешает. Для того чтобы продолжать движение, дислокация должна преодолеть противодействующие пики напряжения, которые таким образом вносят вклад в величину предела текучести. Выстроенные в ряды группы дислокаций одного знака, возникающие из одного источника, задерживаются у прочного барьера, образуя довольно сильное поле внутреннего напряжения. Происходит начальное упрочнение в поликристаллах при деформации.

Первая стадия деформации в ГЦК-металлах весьма слабая и поэтому закономерно появление результирующего деформационного упрочнения уже на первых циклах знакопеременного нагружения.

Для объяснения деформационного упрочнения в ГЦК-кристаллах введено понятие о барьерах, которые легко образуются в этих структурах и способны сдерживать обратное движение дислокаций, появившихся при деформации.

В никеле высокой чистоты наблюдается первоначальный спад деформационного упрочнения с последующей высокой скоростью упрочнения на второй линейной стадии (см. рис. 1).

В поликристаллических металлах с ГЦК-структурой по завершении первой стадии деформации (легкое скольжение) наступает линейная стадия деформации, при которой происходит образование линий скольжения. Густота расположения и интенсивность развития этих многочисленных коротких линий скольжения зависят от исходного состояния субструктуры. Известно, что каждая линия возникает в источнике Франка–Рида и заканчивается замком Коттрелла–Ломера.

Быстрый рост деформационного упрочнения свидетельствует об одновременном скольжении по многим плоскостям и быстром образовании барьеров Ломера–Коттрелла.

На третьей стадии деформации (параболическая стадия) начинается уменьшение скорости упрочнения и происходит интенсивное развитие линий скольжения. В процессе знакопеременного нагружения происходит резкое повышение плотности петель дислокаций, которые образуются в результате

возвратно-поступательного перемещения винтовых дислокаций, имеющих пороги.

Другими словами, изменение деформационного упрочнения связано с тенденцией развития поперечного скольжения винтовых дислокаций, более выраженной при циклическом деформировании, чем при статическом.

В реальных условиях ГЦК-кристаллы не являются ни упруго-, ни структурно-изотропными. В этом потенциальном поле напряжения винтовая дислокация перемещается главным образом в своей основной плоскости скольжения типа  $\{110\}$ . Для увеличения вероятности совершения ею поперечного скольжения необходимо наличие напряжений в плоскостях поперечного скольжения. Таким образом, источники внутренних напряжений в кристалле и являются потенциальными источниками поперечного скольжения винтовых дислокаций. Поперечному скольжению должны способствовать факторы, приводящие к увеличению или возникновению напряжений в потенциально возможных плоскостях поперечного скольжения. Такими факторами могут быть дислокации, образовавшиеся при пластической деформации и способствующие развитию упругих взаимодействий подвижных дислокаций с дислокациями, накопленными в материале в результате деформации.

Расширение линий смещения в полосы происходит в результате потери дислокаций, скопившихся вблизи интенсивной линии вследствие поперечного скольжения. Таким образом, процесс расширения полос скольжения связан с размножением дислокаций.

Точечные дефекты (вакансии и межузельные атомы), которые также образуются при пластической деформации, слишком подвижны и малочисленны и их роль незначительна в ГЦК-металлах.

В процессе знакопеременного нагружения в местах появления полосы скольжения могут образоваться выступы и впадины, которые с увеличением числа циклов растут. Основой для этого является получение типичной структуры волнообразных прерывистых полос скольжения в циклически нагруженных кристаллах, аналогичной структуре полос скольжения, характерной для третьей стадии скольжения в ГЦК-кристаллах и связанной с повышенной частотой поперечного скольжения.

В результате усиливающего поперечного скольжения, которое увеличивает сдвиговую деформацию и уменьшает вклад в упрочнение каждой петли дислокации, происходит резкое уменьшение упрочнения на третьей стадии.

По мере увеличения внутреннего напряжения в результате возрастания плотности дислокаций у барьеров Ломера–Коттрелла под действием знакопере-

менного нагружения создаются условия для перехода в другую плоскость, пересекающуюся с первой. Очевидно, что обе плоскости должны быть параллельны направлению сдвига вектора Бюргерса, и винтовые участки дислокационной петли при этом претерпевают поперечное скольжение.

Металлы с ГЦК-структурой имеют мало возможностей для поперечного скольжения. Принято считать, что в ГЦК-металлах скольжение может проходить только в плоскостях (111). Направления скольжения в таких металлах вполне определены, что подтверждается данными о векторе Бюргерса дислокаций скольжения. Поскольку в ГЦК-кристаллах в равномерном поле напряжений винтовая дислокация стремится двигаться главным образом в своей основной плоскости скольжения, то для увеличения вероятности ее поперечного скольжения необходимо наличие напряжений в плоскости скольжения. То есть источники внутренних напряжений в кристалле и являются потенциальными источниками поперечного скольжения винтовых дислокаций. Но если этот вид скольжения может быть подавлен с помощью достаточно коротких импульсов напряжения, то обнаруживается дополнительное скольжение в плоскостях (123).

Это свойство, проявляющееся при определенных термомеханических условиях, было применено в третьей партии образцов, что позволило избежать интенсивного развития полос скольжения.

Дислокации, переходя с одной плоскости скольжения на соседнюю, параллельную, рекомбинируются с последующим расщеплением уже в новой плоскости. Ступеньки на сильно расщепленных дислокациях характеризуются высокой энергией, и поэтому в условиях термического равновесия их число невелико. Тогда переползание дефекта упаковки легче осуществить путем прямого поглощения или испускания точечных дефектов без помощи уже существующих ступенек.

Процессы переползания совершенно неэффективны при малых пресыщениях, создаваемых при пластической деформации, высокотемпературном нагреве, отжиге, полигонизации или ползучести. Они могут протекать лишь при больших пресыщениях, создаваемых, например, резкой закалкой.

После резкой закалки (партия 2) наблюдается повышение предела текучести и общее однородное упрочнение, которое обусловлено образованием в объеме кристаллов дислокационных петель вследствие конденсации вакансий. Процесс пересечения этих петель движущейся дислокацией и вызывает развитие деформационного упрочнения.

Предел текучести в начальный момент после резкой закалки связан с прочным закреплением ранее

существующих дислокаций. После такой закалки скорость поступления вакансий к дислокации больше, чем скорость их исчезновения в результате диффузии к ранее существующим ступенькам. Поэтому вакансии конденсируются у дислокации. В металлических кристаллах такая конденсация приводит к переползанию дислокаций. Так как в металлах с ГЦК-структурой переползание ограничено плоскостями поперечного скольжения, то образовавшееся внутри энергетическое состояние приводит к интенсивному развитию плотности полос скольжения.

Наличие границ зерен препятствует большому развитию легкого скольжения, так как у границ зерен образуются скопления дислокаций и большие деформации возможны только тогда, когда возможна релаксация напряжений, создаваемых этими скоплениями. В противном случае происходит нарушение рельефа поверхности в полосах скольжения и возникновение начальных стадий усталостных трещин на границах зерен (рис. 2, б).

На границе зерна обычно оказывается более чем одна линия скольжения. При этом скопление или граница зерна выдавливает петлю дислокации в другое зерно. Часть петли остается у границы зерна, снижая образовавшее ее напряжение, а остальные движутся в другом зерне.

При нагреве до достаточно высоких температур в процессе отжига (партия 1) большая часть дефектов устраняется вследствие диффузии. Дислокации при нагреве перемещаются таким образом, что накопленная упругая энергия уменьшается. Весь объем материала разупрочняется постепенно и равномерно. Часть дислокаций в следах скольжения рассеяны более или менее беспорядочно и некоторые из них аннигилируют друг с другом. Оставшиеся дислокации перераспределяются, образуя стенки дислокаций одного знака. В результате образуются "субграницы" с малой энергией, разделяющие весьма совершенные, но разориентированные друг относительно друга "субзерна". Беспорядочное распределение дислокаций по окончании процесса отжига способствует уменьшению исходного состояния твердости (см. рис. 1, б). Учитывая, что в отожженных кристаллах плотность оставшихся дислокаций низка, то при дальнейшем знакопеременном испытании возникают следы скольжения, некоторые из которых отличаются интенсивностью лишь на участке своей длины. Поэтому дальнейшее возникновение и развитие полосы скольжения не всегда доходит до границы зерна (рис. 2, а).

В упрочненном закалкой никеле значение предела текучести в начальный момент после резкой закалки связано с прочным закреплением ранее существующих дислокаций. Наблюдаемое увеличение твердости

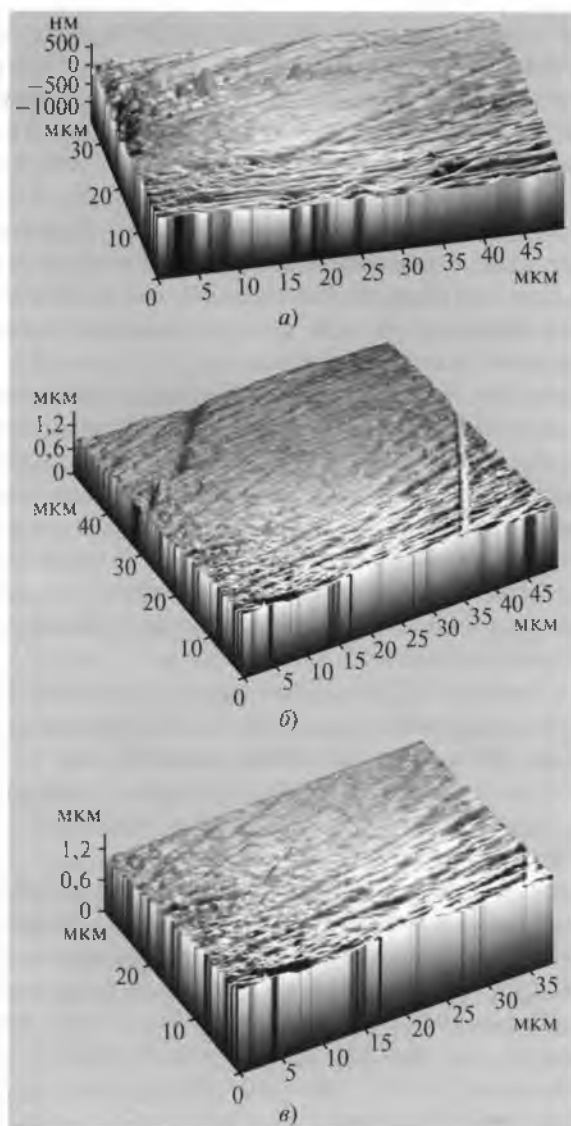


Рис. 2. Топография и профилограмма поверхности при достижении максимального предела текучести отожженных (а), закаленных (б) и деформационно-состаренных (в) образцов никеля ( $n = 6$ )

при этом (см. рис. 1, б) должно быть обусловлено появлением ступенек на существующих дислокациях. Развитие знакопеременного напряжения приводит к одновременному снижению и предела текучести, и твердости для всех партий исследуемого никеля. Очевидно, в процессе деформации происходит разрушение дислокационной структуры. Поскольку и у отожженных, и закаленных образцов значение плотности дислокационной структуры незначительно отличается порядком, то и механизм разрушения существующей дислокационной структуры, очевидно, будет один и тот же – разрушение петель. Первая дислокация, движущаяся в основной плоскости скольжения, должна как бы распутывать встречающиеся петли. Это приво-

дит к резкому спаду механических параметров во всех партиях исследуемых образцов. Поэтому следующие за ней дислокации будут более подвижны, но в процессе дальнейшего знакопеременного нагружения происходит образование барьеров Ломера–Коттрелла.

Выстроенные в ряды группы дислокаций одного знака, возникающие из одного источника, задерживаются у прочного барьера, образуя довольно сильное поле внутреннего напряжения. Происходит резкое упрочнение во всех трех партиях исследуемого никеля, отличающихся только скоростью упрочнения и абсолютной величиной прироста (см. рис. 1, а).

Несмотря на низкую плотность дислокаций во второй, и особенно первой, партиях образцов, твердость возрастает с увеличением циклического нагружения, что связано с появлением либо ступенек на дислокациях, либо дислокационных петель (см. рис. 1, б). Подобные петли и геликоиды наблюдались в кристаллах  $\text{CaF}_2$  после обработки при температуре 1373 К, что может быть вызвано пересыщением в объеме кристалла вакансий. Они были также обнаружены в германии в области кристалла с очень малой плотностью дислокаций, т.е. там, где имелось мало стоков, на которых вакансии могли бы исчезать при охлаждении.

Последующее заметное уменьшение деформационного упрочнения и развитие процесса разупрочнения связано с развитием поперечного скольжения и интенсивным образованием полос скольжения.

Выстроенные в группы перед барьером дислокации приводят в действие другие источники в том же зерне или в соседних зернах, из которых исходят дислокации с вектором Бюргерса, направленным таким образом, что величина приложенных напряжений уменьшается. В собственном зерне под действием возникших внутренних напряжений увеличивается плотность дислокаций, что способствует образованию следов скольжения, которые зачастую преобразуются в полосы скольжения. Часть дислокаций переходит в сопряженную, параллельно расположенную плоскость, где они не могут двигаться с такой же легкостью, как в основной, поскольку часть петли все еще может находиться в сопряженных плоскостях.

Однако линии пересечения дислокации обычно не совпадают с нормальными плоскостями скольжения в соседнем зерне и плоскости скольжения одного зерна не продолжают в соседнем зерне.

В последнем случае происходят значительные перестройки у границы зерна. На практике эта проблема разрешается путем образования полосы скольжения, которая частично исчезает при достижении окрестности границы зерна, что приводит к увеличению напряжения, составляющего часть образованного упрочнения.



Эффекта концентрации напряжения, возникающего при соприкосновении начальной полосы скольжения с границей зерна, можно избежать, если продолжить скольжение в соседнее зерно.

Соответственно, в соседнем зерне дислокации должны или передвигаться путем поперечного скольжения до плоскостей, совпадающих точно с плоскостями скольжения в обоих зернах, или же плоскости скольжения в обоих зернах не совпадают и тогда скольжение второго зерна стремится совпасть с линией или полосой образования зигзагообразной линии (рис. 2, в).

Необходимость поперечного скольжения подтверждает, что начальное упрочнение должно быть тем более заметным, чем труднее идет процесс поперечного скольжения.

Дополнительное деформирование с остаточной деформацией около 2,0 % создает условия для совершения более свободного поперечного скольжения и тем самым избежать роста полос скольжения, характерных для образцов первой и второй партий. Увеличение плотности следов скольжения при незначительном увеличении полос скольжения говорит о возникшей возможности более свободного перемещения по плоскостям скольжения дислокаций в образцах третьей партии по сравнению с отожженными и закаленными образцами (рис. 2, а–в).

### Заключение

Таким образом, значения предела текучести и твердости при знакопеременном циклическом нагружении находятся в зависимости от наличия и концентрации подвижных дислокаций. С этой точки зрения

происходящее аномальное изменение твердости и упрочнения в начальный период смены направления деформации связано со слабой блокировкой дислокаций. Дальнейшее упрочнение с увеличением числа циклов деформации возможно, если оставшиеся подвижные дислокации будут возвратно-поступательно перемещаться между заблокированными дислокациями. Скорость и величина упрочнения на данном этапе зависят от структурного состояния. Эффект Баушингера свидетельствует о наличии подвижных дислокаций и об изменении направления их перемещения. Дальнейшее увеличение циклов знакопеременного нагружения способствует абсолютному увеличению предела текучести и твердости, но при этом заметно снижается скорость упрочнения. На поверхности образцов после соответствующей обработки видны линии скольжения, а в образцах первой и второй партий, кроме того, образуются полосы скольжения, интенсивность развития которых возрастает с увеличением числа циклов. Поверхность образцов отличается шероховатостью и сложностью распределения выступов и впадин. Пластическое деформирование закаленных образцов с последующим старением под напряжением при комнатной температуре позволяют создать более спокойную поверхность с выходом в основном линий скольжения.

По характеру распределения линий и полос скольжения, состоянию рельефа можно судить о состоянии внутреннего напряжения в объеме кристалла.

Деформационное старение закаленного никеля снижает влияние эффекта Баушингера на прочностные характеристики (предел текучести, микротвердость) и повышает эксплуатационные свойства (долговечность).

## Уважаемые читатели!

Продолжается подписка

на научно-технический и производственный журнал  
"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

Подписные индексы по каталогам:

"Роспечать" – 85159, "Пресса России" – 39269, "Почта России" – 60252.

Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи или непосредственно в издательстве по адресу:

Россия, 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4,  
ООО "Издательство Машиностроение"

Тел.: (495) 269-66-00 (отдел реализации), (495) 268-40-77 (редакция);

e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), [utp@mashin.ru](mailto:utp@mashin.ru)