

УДК 669.1'26:539.37.004.9

В.А. КУКАРЕКО, д-р физ.-мат. наук, доцент

начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний

материалов и изделий машиностроения

E-mail: v_kukareko@mail.ru

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.08.2015.

МЕХАНИЗМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ СПЛАВАХ

Предложен механизм локализации деформации дисперсионно-твердеющих поликристаллических материалов, основанный на учете статистической неоднородности в распределении частиц по плоскостям скольжения и неоднородности размера частиц. Методами компьютерного моделирования показано, что уменьшение размера зерна дисперсионно-твердеющего сплава и количества, содержащихся в зерне частиц, а также образование полидисперсной смеси частиц на стадии их коагуляционного роста при старении существенно усиливают проявление неоднородности в распределении выделений по матрице.

Ключевые слова: дисперсионно-твердеющий сплав, частицы, статистическая неоднородность, локализация деформации

Введение. Для металлических систем характерна стохастичность (случайность) в формировании их структурных элементов, а также в протекании различных процессов при определении физико-механических свойств материалов. В связи с этим для таких систем подходы математической статистики необходимы не только на стадии обработки результатов измерений, но также и на стадии построения физических моделей явлений, протекающих в металлических материалах при их термической обработке и нагружении. Так, например, при анализе эффектов дисперсионного упрочнения поликристаллических материалов, содержащих частицы дисперсных фаз, было установлено, что величина упрочнения на поздних стадиях старения сильно зависит от размера зерен сплава [1, 2], что не вытекает из детерминированных дислокационных теорий упрочнения. В работах [3, 4] было обнаружено явление ускоренного разупрочнения мелкозернистых дисперсионно-твердеющих сплавов, которое также не находит объяснения в рамках традиционных представлений. На рисунке 1 приведена зависимость прироста твердости ΔHV от продолжительности старения при различных температурах образцов сплава ХН67ВМТЮ различной зернистости [5]. Можно видеть, что по мере уменьшения размера зерна сплава кинетика, его разупрочнения на поздних стадиях старения существенно ускоряется. В [3–5] при анализе причин ускоренного разупрочнения мелкозернистых сплавов было показано, что существенное влияние на эффективность дисперсионного упрочнения поликристаллических материалов оказывает неоднородность (стохастичность) распределения частиц по объему зерна. В соответствии с представлениями, развиваемыми в [3–5], снижение эффектов дисперсионного упрочнения

сплавов с частицами может быть обусловлено локализацией актов пластической деформации в прослойках матрицы, обедненных выделениями. При этом образование прослоек с пониженной плотностью выделений вызвано статистической неоднородностью в распределении частиц по плоскостям скольжения и упорядоченностью в их пространственном расположении по объему зерна, усиливающимися на стадиях коагуляционного роста выделений.

Из проведенного в [3–6] анализа вытекает, что определяющее влияние на вероятность появления прослоек с пониженной плотностью частиц оказывают такие структурные параметры сплава, как размер зерна сплава, количество содержащихся в

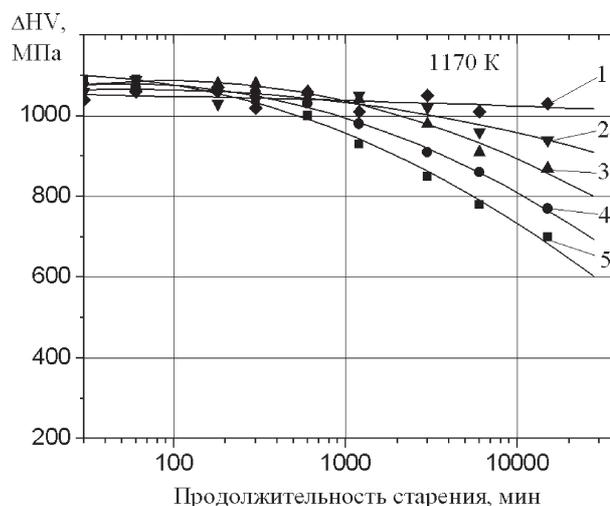


Рисунок 1 — Зависимость прироста твердости ΔHV от продолжительности старения при различных температурах образцов сплава ХН67ВМТЮ различной зернистости (кривые 1, 2, 3, 4, 5 отвечают диаметрам зерна соответственно равным 0,36; 0,128; 0,084; 0,055 и 0,028 мм [5])

зерне частиц второй фазы, характер их пространственного расположения. Важным следствием статистической модели разупрочнения является положение об усилении неоднородности распределения частиц по плоскостям скольжения в приграничных объемах зерен. Проведенный автором данной работы анализ показал, что наряду с вышеперечисленными факторами существенное влияние на вероятность появления прослоек и разупрочнение сплава может оказывать также и неоднородность размера присутствующих в сплаве частиц. Для комплексной количественной оценки влияния основных структурных параметров гетерофазных сплавов на вероятность появления в них плоскостей с пониженной плотностью выделений в настоящей работе проведено вычислительное моделирование хаотического размещения упрочняющих частиц в зерне с последующим определением содержания в нем плоскостей скольжения, характеризующихся пониженной долей пересечений с частицами.

Методика эксперимента. При моделировании использовались зерна двух форм — сферической и кубической. Сферическое зерно являлось моделью зерен металлических материалов. Выбор кубической формы зерна обусловлен ее удобством для проведения сравнительных расчетов, а также тем обстоятельством, что с помощью кубических зерен легко конструировать многослойные объекты. В процессе моделирования проводилось размещение заданного количества упрочняющих частиц с заданной объемной долей в теле зерна и полагалось, что частицы расположены хаотически, имеют сферическую форму, не пересекаются друг с другом, а также не пересекают границы моделируемого объема. Расчет выполнялся как для случая однородных по размеру частиц, так и для полидисперсной смеси частиц (рисунок 2). Перед выполнением расчета задавался тип зерна (куб/сфера), объемная доля и число частиц в моделируемом объеме N_v . Для случая

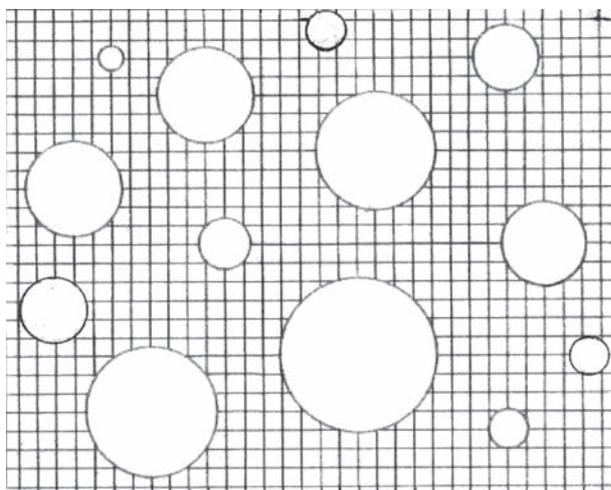


Рисунок 2 — Схема полидисперсных частиц, образующихся в дисперсионно-твердеющих сплавах на стадиях коагуляционного роста выделений

полидисперсных частиц определялись параметры дискретного распределения частиц по размерам с использованием Вагнеровского распределения [7]. Процесс непосредственного размещения частиц в моделируемом объеме осуществлялся с использованием генератора случайных чисел. После завершения процедуры размещения частиц в моделируемом объеме производилось сечение зерна равноотстоящими плоскостями $x_i = \text{const}$ (начиная с $i = 1$, что соответствовало центру зерна, до $i = 2000$, что соответствовало краю моделируемого объема). Для каждой такой плоскости вычислялись количество частиц в сечении N_i , значение суммарной площади сечений частиц ΣS_i^u плоскостью i , площадь i -го сечения зерна S_i , а также их отношение $\Sigma S_i^u / S_i = f_i$, которое фактически представляет собой значение объемной доли, попавших в i -е сечение частиц. Количество частиц в моделируемом сферическом объеме изменялось от $N_v = 16 \cdot 10^3$ до $N_v = 3000 \cdot 10^3$. Номинальная объемная доля выбиралась равной $f_n = 0,05; 0,1$ и $0,2$. При этом число выделений, приходящихся на экваториальную плоскость сечения сферического зерна N_{max} , варьировалось в пределах от $N_{\text{max}} = 440$ частиц до $N_{\text{max}} = 14500$ частиц. Среднее число частиц, пересекаемых средней плоскостью сечения сферического зерна N , в этом случае изменялось от $N = 295$ частиц до $N = 9650$ частиц. Верхний предел значения $N_{\text{max}} = 14500$ частиц ($N \approx 10^4$ частиц) приблизительно соответствовал значению $N_n \sim 10^4$ при котором в эксперименте [3, 4] регистрировалось снижение твердости типичного дисперсионно-твердеющего сплава ХН67ВМТЮ, характеризующегося близким к хаотическому распределением частиц по объему зерна.

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 3 приведены полученные зависимости распределения значений фактической объемной доли f_i полидисперсных частиц, пересекаемых сечениями x_i по высоте сферического и кубического зерна, для случаев существенно различных количеств частиц N_v , размещенных в моделируемом объеме. Фактически в этом случае моделировался процесс коагуляции дисперсных частиц и/или уменьшения размера зерна. Можно видеть, что с уменьшением количества размещенных в зерне частиц рассеяние значений f_i резко возрастает, что свидетельствует об увеличении вероятности появления прослоек из плоскостей с пониженной объемной долей частиц (см. рисунок 3). Для разных N_v , по мере удаления от экваториального сечения сферического зерна и приближения к его границе, регистрируется сильное увеличение рассеяния в объемной доле частиц f_i , пересекаемых плоскостями сечения i , а в приграничных объемах зерна значения f_i падают до нуля (см. рисунок 3 а–в). При этом даже в случае больших N_v в приграничных областях сферического зерна рассеяние значений f_i в 2–3 раза превыша-

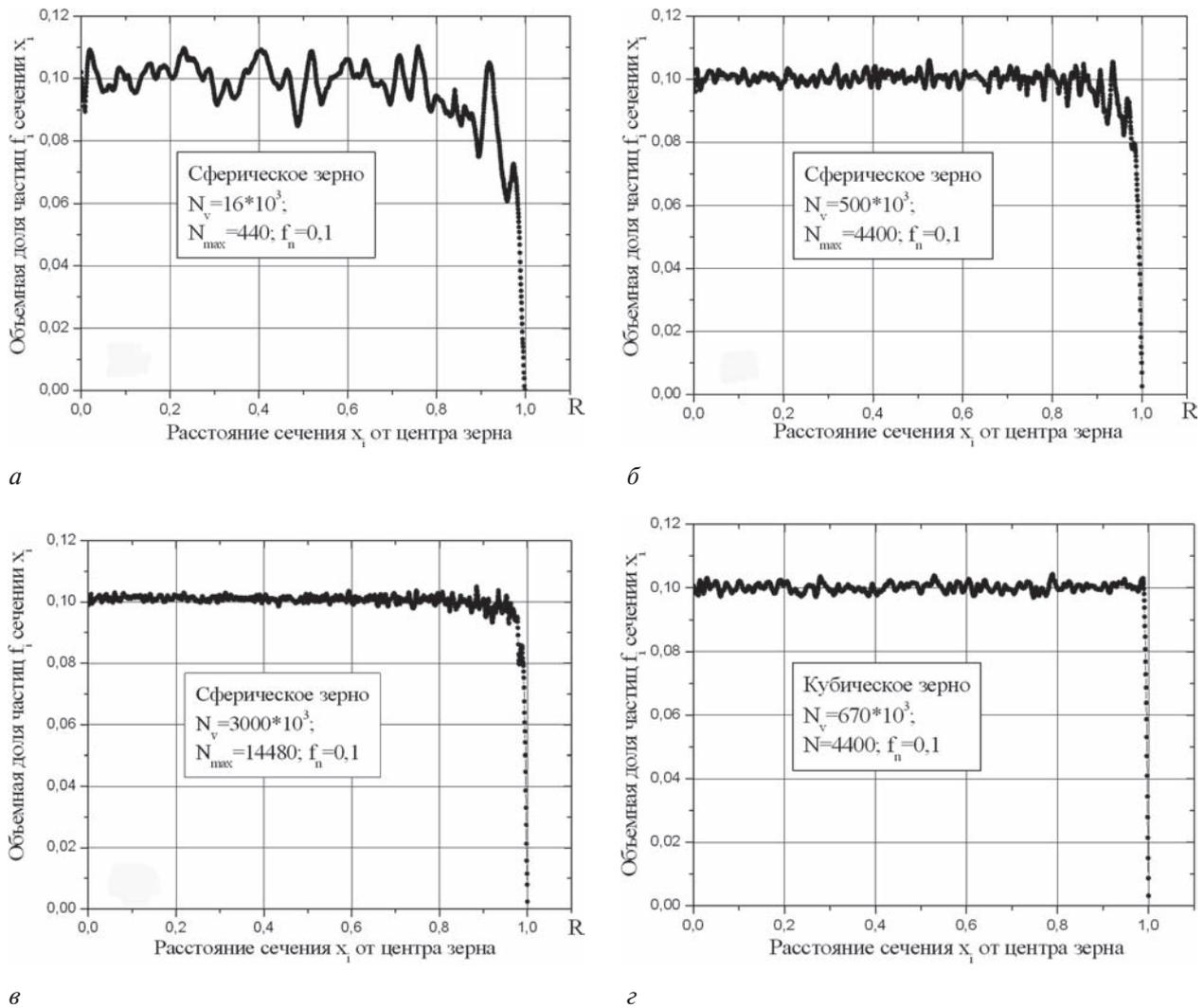


Рисунок 3 — Распределение значений фактической объемной доли полидисперсных частиц f_i , пересекаемых сечениями x_i по высоте моделируемого зерна, для различного числа размещенных в зерне частиц:

a – $в$ — сферическое зерно; $г$ — кубическое зерно; N_v — число частиц, размещенных в моделируемом объеме; N_{\max} — число частиц, пересекаемых экваториальной плоскостью сферического зерна; f_n — номинальная объемная доля частиц

ет рассеяние этой величины в центральных областях зерна (см. рисунок 3 $в$). В случае кубического зерна увеличения рассеяния в значениях f_i по мере приближения к границам моделируемого объема не обнаруживается (см. рисунок 3 $г$).

На рисунке 4 приведены эмпирические функции распределения значения относительной объемной доли частиц f_i / f_n (здесь f_n — номинальная объемная доля частиц), пересекаемых плоскостями сечения, для случаев разного количества частиц, размещенных в объеме сферического зерна. Можно видеть, что по мере уменьшения количества частиц, содержащихся в объеме зерна, резко возрастает вероятность появления плоскостей с пониженной объемной долей пересекаемых ими частиц. В частности, при значениях N_v , равных $3\,000 \cdot 10^3$, $2\,000 \cdot 10^3$, $1\,000 \cdot 10^3$, $500 \cdot 10^3$, $300 \cdot 10^3$, $200 \cdot 10^3$, $100 \cdot 10^3$, $50 \cdot 10^3$ и $16 \cdot 10^3$ вероятность появления плоскостей с объемной долей менее 95 % от номинальной составляет соответственно 4; 5; 6; 9; 10; 13; 15; 17 и ~25 %. Неоднородность размеров

(полидисперсность) частиц и уменьшение объемной доли частиц, содержащихся в моделируемом объеме, также приводят к возрастанию вероятности появления прослоек с пониженной плотностью выделений (рисунок 5). Указанные закономерности находятся в полном соответствии с предложенной в [4] статистической моделью разупрочнения сплавов с частицами выделений. Появление сечений (прослоек) с пониженной объемной долей частиц в первую очередь связано с высокой статистической неоднородностью распределения полидисперсных частиц в приграничных объемах сферических зерен. Об этом свидетельствует относительно низкое рассеяние значений f_i , регистрируемое для кубического зерна (см. рисунок 5, кривая 3). В частности, вероятность появления прослоек с объемной долей частиц менее 95 % от номинальной для кубического зерна с $N_v = 500 \cdot 10^3$ составляет только 2 %, что существенно меньше (в 4–5 раз) соответствующих значений накопленной вероятности появления таких прослоек для сферических зерен

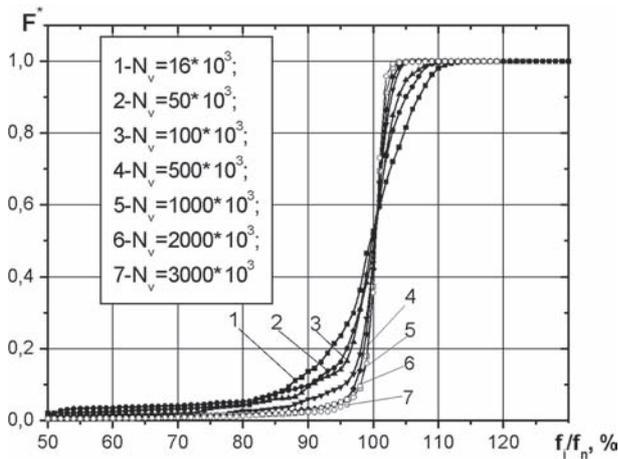


Рисунок 4 — Функции распределения значения относительной объемной доли полидисперсных частиц f_i/f_n , пересекаемых сечениями x_i сферического зерна для различного числа размещенных в нем частиц N_v при номинальной объемной доле $f_n = 0,1$:
 1 — $N_v = 16 \cdot 10^3$; $N_{max} = 440$; $N = 295$; 2 — $N_v = 50 \cdot 10^3$; $N_{max} = 945$; $N = 630$; 3 — $N_v = 100 \cdot 10^3$; $N_{max} = 1\,500$; $N = 1\,000$; 4 — $N_v = 500 \cdot 10^3$; $N_{max} = 4\,400$; $N = 2\,930$; 5 — $N_v = 1\,000 \cdot 10^3$; $N_{max} = 7\,000$; $N = 4\,650$;
 6 — $N_v = 2\,000 \cdot 10^3$; $N_{max} = 11\,050$; $N = 7\,370$;
 7 — $N_v = 3\,000 \cdot 10^3$; $N_{max} = 14\,480$; $N = 9\,650$ (N — среднее количество частиц, пересекаемое средней плоскостью сечения сферического зерна)

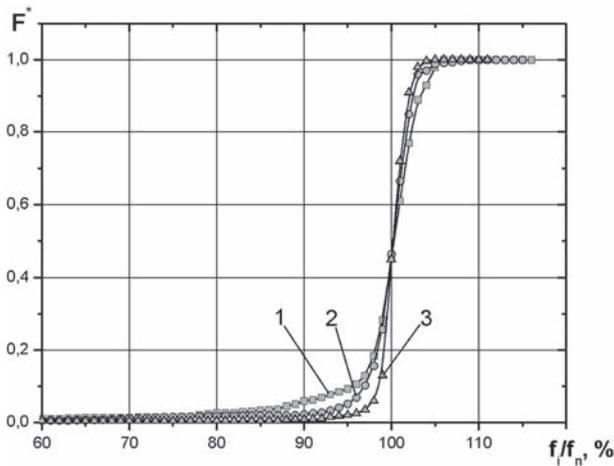


Рисунок 5 — Функции распределения значения относительной объемной доли частиц f_i/f_n , пересекаемых сечениями x_i сферического (1, 2) и кубического (3) зерен:
 1 — полидисперсные частицы $N_v = 500 \cdot 10^3$, $f = 0,1$;
 2 — однородные частицы $N_v = 500 \cdot 10^3$, $f = 0,1$;
 3 — однородные частицы $N_v = 500 \cdot 10^3$, $f = 0,1$

(см. рисунок 5). Проведенные оценки показали, что приграничные объемы, в которых регистрируется появление прослоек с пониженной плотностью выделений, могут при относительно малых N_v занимать до 70 % от общего объема зерна (см. рисунок 3 а, б).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в поликристаллическом материале, содержащем частицы дисперсных фаз, каждое зерно, по сути, является объектом, имеющим градиент свойств по мере перехода от поверхности к центру зерна. При этом поверхностные слои содержат прослойки с существенно пониженной объемной долей частиц, а соответственно и повышенной пластичностью. В таких

прослойках при механическом нагружении поликристаллического агрегата локализуются пластические сдвиги, которые аккомодируют различие в деформациях смежных зерен (рисунок 6) и способствуют сохранению сплошности деформируемого материала. По мере уменьшения среднего размера зерна в сплаве и среднего количества содержащихся в нем частиц, а также появления неоднородности в размерах выделений возрастает доля объема зерна, содержащего прослойки с пониженной объемной долей пересекаемых частиц. Последнее приводит к снижению сдвигового напряжения, обеспечивающего пластическое деформирование поликристаллического агрегата с дисперсными частицами, а, следовательно, и к понижению эффекта дисперсионного упрочнения, т. е. к разупрочнению. На рисунке 6 приведена схема, иллюстрирующая пластическое течение в приграничных объемах поликристаллического агрегата, содержащего дисперсные частицы.

Представляло интерес сопоставить данные моделирования с экспериментальными результатами изучения кинетики разупрочнения мелкозернистого сплава ХН67ВМТЮ, являющегося удобным модельным объектом вследствие присущей этому сплаву весьма замедленной кинетики пространственного упорядочения выделений по объему матрицы [8]. На рисунке 7 представлены графики зависимости вероятности F^* появления плоскостей скольжения с $f_i < 0,95f_n$ (при $f_n = 0,1$) и относительной величины снижения прироста твердости $\Delta(\Delta HV) / \Delta HV_{max}$ для сплава ХН67ВМТЮ в процессе длительного изотермического старения при 1220 К ($f = 0,09$) в зависимости от среднего количества частиц N , пересекаемых средней плоскостью скольжения зерна ($\Delta(\Delta HV) / \Delta HV_{max} = (\Delta HV_{max} - \Delta HV_c) / \Delta HV_{max}$, здесь $\Delta HV_{max} = HV_{max} - HV_0$; $\Delta HV_c = HV_c - HV_0$, где HV_0 — твердость закаленного сплава; HV_{max} — твердость сплава на стадии максимального упрочнения при данной температу-

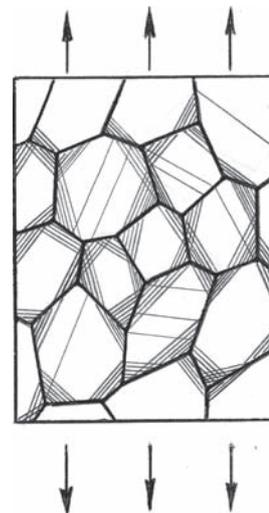


Рисунок 6 — Схема локализации деформации в приграничных объемах зерен с дисперсными частицами при механическом нагружении

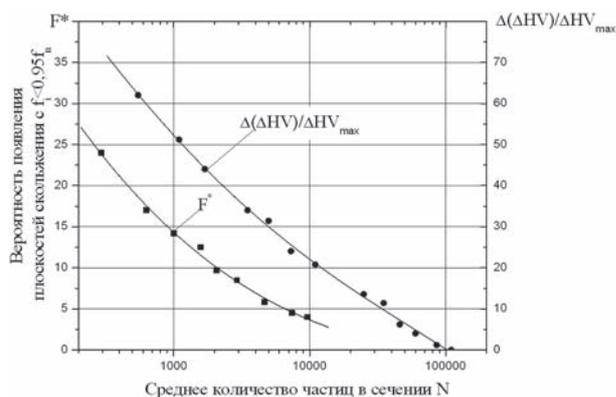


Рисунок 7 — Зависимость вероятности F^* появления плоскостей скольжения с $f_s < 0,95f_n$ (при $f_n = 0,1$) и относительной величины снижения прироста твердости $\Delta(\Delta HV) / \Delta HV_{\max}$ для сплава ХН67ВМТЮ в процессе длительного изотермического старения при 1220 К ($f = 0,09$) от среднего количества частиц N , пересекаемых средней плоскостью скольжения зерна

ре старения; HV_c — твердость сплава на стадии перестаривания). График зависимости $\Delta(\Delta HV) / \Delta HV_{\max}$ от N построен на основании данных, приведенных в работе [8]. Из представленных на рисунке 7 зависимостей можно видеть, что между вероятностью появления плоскостей скольжения с пониженной плотностью выделений и разупрочнением сплава существует четкая корреляция.

Полученные результаты позволяют с новых позиций осветить хорошо известное в науке и практике явление зернограничного проскальзывания и зернограничной релаксации присущее дисперсионно-твердеющим сплавам [9–11], а также прогнозировать эффективность дисперсионного упрочнения для материалов с упорядоченным расположением частиц и ультрадисперсным размером зерна. В частности, можно ожидать пониженную эффективность дисперсионного упрочнения в нанокристаллических материалах, содержащих частицы дисперсных фаз. Кроме этого, повышенная статистическая неоднородность распределения частиц в нанокристаллических дисперсионноупрочненных материалах может способствовать ускоренной локализации деформации в них и понижению сопротивления разрушению материалов при нагружении.

Заключение. Проведено моделирование хаотического распределения упрочняющих частиц по объему зерна дисперсионно-твердеющего сплава для случая различной объемной доли и размера частиц. Показано, что уменьшение количества частиц, содержащихся в объеме зерна, приводит к увеличению вероятности появления плоскостей с пониженной объемной долей пересекаемых ими частиц — появлению прослоек с пониженной

плотностью выделений. Сделано заключение, что разупрочнение дисперсионно-твердеющих сплавов преимущественно связано с локализацией деформации в прослойках, состоящих из плоскостей скольжения с пониженной плотностью выделений. Формирование таких прослоек обусловлено неоднородным распределением частиц по объему зерна, которое возникает на определенных стадиях старения вследствие статистической неоднородности распределения частиц по объему и образования полидисперсной смеси частиц. Уменьшение размера зерна сплава, а также количества содержащихся в нем частиц и их объемной доли усиливает проявление неоднородности в распределении выделений и способствует более глубокому разупрочнению сплавов. Наиболее вероятным местом локализованной деформации в прослойках с пониженной концентрацией частиц являются приграничные объемы зерна, составляющие существенную долю от его общего объема.

Список литературы

1. Phillips, V. Hardening Mechanisms in a Precipitation Hardenable Nickel 12,7 at. % Aluminium Alloys / V. Phillips // Phil. Mag. — 1967. — Vol. 16, no. 139. — Pp. 103–117.
2. Травина, Н.Т. О некоторых закономерностях деформации и упрочнения монокристаллов стареющих сплавов / Н.Т. Травина // МиТОМ. — 1977. — № 2. — С. 16–20.
3. Гитгарц, М.И. Влияние размера зерна на процессы разупрочнения дисперсионно-твердеющих сплавов на поздних стадиях старения / М.И. Гитгарц, В.А. Кукарко // Докл. АН СССР. — 1988. — Т. 301, № 2. — С. 336–340.
4. Гитгарц, М.И. О статистической природе разупрочнения дисперсионно-твердеющих сплавов при длительном изотермическом старении / М.И. Гитгарц, В.А. Кукарко // Физика металлов и металловедение. — 1989. — Т. 68, № 3. — С. 582–589.
5. Кукарко, В.А. Субмикроскопическая структура и ее роль в формировании физико-механических свойств дисперсионно-упрочненных материалов на никелевой и железной основах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.А. Кукарко. — Томск, 2004. — 36 с.
6. Кукарко, В.А. Статистическая модель локализации деформации и разупрочнения поликристаллических дисперсионно-твердеющих сплавов. Вычислительное моделирование / В.А. Кукарко // Физика металлов и металловедение. — 2006. — Т. 102, № 3. — С. 355–362.
7. Wagner, C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umleer (Ostwald - Reifung) / C. Wagner // Z. Electrochem. — 1961. — Vol. 6, No. 3. — Pp. 581–591.
8. Гитгарц, М.И. Роль субмикроскопической структуры в сопротивлении микропластической деформации дисперсионно-твердеющих сплавов на никель-хромовой основе. 1. Стадия упрочнения. 2. Стадия разупрочнения / М.И. Гитгарц, В.А. Кукарко // Физика металлов и металловедение. — 1985. — Т. 60, № 4. — С. 798–815.
9. Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф.Ф. Химушин. — М.: Металлургия, 1969. — 750 с.
10. Симс, Ч. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель. — М.: Металлургия, 1976. — 567 с.
11. Новокшенов, В.Ю. Дислокационная модель и кинетика высокотемпературного зернограничного проскальзывания / В.Ю. Новокшенов, Ш.Х. Ханнанов // Физика металлов и металловедение. — 1984. — Т. 57, № 5. — С. 1015–1020.

KUKAREKO Vladimir A., Dr. Phys.-Math. Sc., Associate Professor

Head of the Center of Structural Research and Tribo-Mechanical Test of Materials and Machine-Building Output

E-mail: v_kukareko@mail.ru

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, The Republic of Belarus

Received 31 August 2015.

MECHANISM OF PLASTIC DEFORMATION LOCALIZATION IN POLYCRYSTALLINE PRECIPITATION-HARDENING ALLOYS

The mechanism of strain localization of polycrystalline precipitation hardening materials based on the account of statistical dissipation in allocation of particles on slip planes and dissipation of the size of particles is proposed. The methods of computer simulation have shown that the decrease of the grain size of precipitation hardening alloy and the decrease of particles amount, contained in a grain and also the formation of particles polydisperse mixture at the coagulative growth stage during aging, intensify the dissipation in allocation of particles on a matrix.

Keywords: precipitation-hardening alloy, particles, statistical dissipation, strain localization

References

1. Phillips V. Hardening Mechanisms in a Precipitation Hardenable Nickel - 12,7 at. % Aluminium Alloys. *Phil. Mag.*, 1967, vol. 16, no. 139, pp. 103–117.
2. Travina N.T. O nekotoryh zakonomernostjakh deformacii i uprochnenija monokristallov starejushhijh splavov [Some regularities of deformation and hardening of single crystals of aging alloys]. *MiTOM* [Metallurgy and heat treatment], 1977, no. 2, pp. 16–20.
3. Gitgarc M.I., Kukareko V.A. Vlijanie razmera zerna na processy razu-prochnenija dispersionno-tverdejushhijh splavov na pozdnyh stadijah starenija [Effect of grain size on the process of softening of precipitation hardening alloys in the later stages of aging]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1988, vol. 301, no. 2, pp. 336–340.
4. Gitgarc M.I., Kukareko V.A. O statisticheskoj prirode razuprochnenija dispersionno-tverdejushhijh splavov pri dlitel'nom izotermicheskom starenii [On the statistical nature of the softening of precipitation hardening alloys during prolonged isothermal aging]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1989, vol. 68, no. 3, pp. 582–589.
5. Kukareko V.A. *Submikroskopicheskaja struktura i ee rol' v formirovanii fiziko-mehaničeskijh svojstv dispersionno-uprochnennyh materialov na nikel'noj i zheleznoj osnovah: Avt. diss. dokt. fiz.-mat. nauk* [Submicroscopic structure and its role in the physical and mechanical properties of dispersion-strengthened materials on nickel and iron bottoms: Abs. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Tomsk, 2004. 36 p.
6. Kukareko V.A. Statisticheskaja model' lokalizacii deformacii i razuprochnenija polikristallicheskijh dispersionno-tverdejushhijh splavov. Vychislitel'noe modelirovanie [Statistical model of localization of deformation and softening of polycrystalline precipitation hardening alloys. Computational modeling]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 2006, vol. 102, no. 3, pp. 355–362.
7. Wagner C. Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umleer (Ostwald-Reifung). *Z. Electrochem.*, 1961, vol. 6, no. 3, pp. 581–591.
8. Gitgarc M.I., Kukareko V.A. Rol' submikroskopicheskijh struktury v so-protivlenii mikroplasticheskoj deformacii dispersionno-tverdejushhijh splavov na nikel'-hromovoj osnove. 1. Stadija uprochnenija, 2. Stadija razuprochnenija [The role of the submicroscopic structure in resisting of microplastic deformation precipitation hardening alloys nickel-chromium basis. 1. The stage of hardening 2. The Stage of softening]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1985, vol. 60, no. 4, pp. 798–815.
9. Himushin F.F. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgija, 1969. 750 p.
10. Sims Ch., Hagel' V. *Zharoprochnye splavy* [The Superalloys]. Moscow, Metallurgija, 1976. 567 p.
11. Novokshenov V.Ju., Hannanov Sh.H. Dislokacionnaja model' i kinetika vysokotemperaturnogo zernogranichnogo proskal'zyvanija [Dislocation model and kinetics of high-temperature grain boundary sliding]. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1984, vol. 57, no. 5, pp. 1015–1020.