

УДК 621.777: 669.275

## ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЛЯ МОЛИБДЕНА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОЙ ДЕФОРМАЦИИ

<sup>1</sup>Смирнов С.В., <sup>1</sup>Нестеренко А.В., <sup>2</sup>Швейкин В.П.

<sup>1</sup>Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург, e-mail: svsv@imach.uran.ru;

<sup>2</sup>УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина – УПИ, Екатеринбург

Экспериментально установлены базовые соотношения механики поврежденности для молибдена высокой чистоты при температурах 500 и 900°C. Диаграммы пластичности, связывающие предельную деформацию до разрушения с показателями напряженного состояния, построены по результатам механических испытаний образцов в условиях гидростатического давления на оригинальной установке. Установлено, что пластичность молибдена значительно зависит от вида напряженного состояния, характеризуемого параметром Лодэ. Определена пластичность в условиях знакопеременной деформации. Исследовано залечивание деформационной поврежденности молибдена при отжиге и определены условия, при которых появляется остаточная поврежденность, не исчезающая при отжиге. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых технологий деформационной обработки молибдена.

**Ключевые слова:** модель накопления деформационной поврежденности, определяющие соотношения механики поврежденности, пластичность

## THE BASIC EQUATIONS OF DAMAGE MECHANICS FOR COMMERCIAL-PURITY MOLYBDENUM AT HEAT DEFORMATION

<sup>1</sup>Smirnov S.V., <sup>1</sup>Nesterenko A.V., <sup>2</sup>Shveykin V.P.

<sup>1</sup>Institute of Mechanical Engineering, Ural Division, Russian Academy of Sciences,

Ekaterinburg, e-mail: svsv@imach.uran.ru;

<sup>2</sup>Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin – UPI, Ekaterinburg

The basic equations of damage mechanics for commercial-purity molybdenum at 500 and 900°C has been found experimentally. Plasticity diagram that relate the limiting strain before the failure to the stress state indices has been constructed according to the results obtained by the original device under hydrostatic pressure. Plasticity of the material is found to depend substantially on the type of stress state, which is characterized by the Lode parameter. Plasticity at alternating deformation has been found. The damage theory is used to study the healing of the deformation-induced damage during annealing and to determine the conditions under which irreversible damage, which cannot be healed by heat treatment, appears. The results may be used to develop new technologies of molybdenum deformation treatment.

**Keywords:** model of accumulation of deformation damage, basic equations of damage mechanics, plasticity

Процессы деформирования твердых тел при их обработке давлением зачастую приводят к исчерпанию способности деформироваться без разрушения. Происходит это из-за образования и развития дефектов сплошности в виде микропор и микротрещин, рассеянных по объему изделия, отрицательно влияющих на комплекс механических, служебных свойств и не поддающихся обнаружению современными методами неразрушающего контроля. Прогнозировать развитие поврежденности и ускорить процесс выбора путей оптимизации способов и режимов деформационной и термической обработок можно с помощью моделей механики поврежденности.

Согласно модельным представлениям научной школы В.Л. Колмогорова [1, 4, 6, 8], под поврежденностью понимается скалярный параметр  $\omega$ , который изменяется от 0 в начальный момент деформации до 1 при разрушении. Промежуточные значения  $\omega$  характеризуют уровень развития микродефектов сплошности относительно его предельного состояния. По расчетной величине  $\omega$  можно количественно оценить степень

использования ресурса пластичности деформируемого металла и качественно оценить морфологические особенности микродефектов, возникающие при пластической деформации металлов, если воспользоваться рекомендациями [1, 8].

На этапах деформации по характеру близкой к простому нагружению поврежденность определяется по формуле

$$\omega = \int_0^{\Lambda} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p}, \quad (1)$$

а на этапах немонотонной деформации – по формуле

$$\omega = \sum_{i=1}^N \left[ \int_{\Lambda_{i-1}}^{\Lambda_i} \frac{d\Lambda}{\Lambda_{pi}} \right]^a, \quad (2)$$

где  $i = 1 \dots N$  – номер этапа немонотонной деформации;  $\Lambda_p$  – функция, аппроксимирующая диаграмму пластичности;  $a$  – величина, характеризующая влияние немонотонности деформации на накопление поврежденности. Основой для расчета поврежденности металла при обработке давлением и оценки

вероятности микро- или макроразрушения являются экспериментальные зависимости пластичности и показателя  $a$  от термомеханических параметров процесса пластической деформации.

Зависимости

$$\Lambda_p = \Lambda_p(k, \mu_\sigma, H, \Theta); \quad (3)$$

$$a = a(k, \mu_\sigma, H, \Theta), \quad (4)$$

где  $k = \frac{\sigma}{T}$  – отношение гидростатического напряжения и интенсивности касательных напряжений, называемое показателем напряженного состояния;  $\mu_\sigma$  – показатель Лоде, характеризующий вид девиатора напряжений;  $H$  – интенсивность скорости деформации сдвига;  $\Theta$  – температура, называются базовыми или определяющими соотношениями механики поврежденности и являются фундаментальными характеристиками материала как объекта пластической обработки, позволяющими осуществлять моделирование процессов разрушения металлов при пластических деформациях.

При термической обработке, которой сопровождаются многие процессы обработки давлением, происходит восстановление пластических свойств металла. В основе явления восстановления пластичности лежат процессы релаксации (возврат, полигонизация, рекристаллизация), наблюдаемые при нагреве деформированного металла, а также диффузионные процессы массопереноса при нагреве в области высоких температур. Степень восстановления ресурса пластичности при термической обработке за счет залечивания деформационной поврежденности характеризуется зависимостью  $\omega_{\text{ост}} = f(\omega_1, \Theta, t)$ , связывающей величину остаточной поврежденности  $\omega_{\text{ост}}$  с ее величиной  $\omega_1$  до термической обработки при температуре  $\Theta$  в течение времени  $t$ .

**Цель.** В работе ставилась задача установить определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена марки МЧВП, используемого как материал труб в энергетике. Выбор молибдена в качестве материала для исследований обусловлен его ограниченной технологической пластичностью, высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, низкотемпературной хрупкостью, высокой окисляемостью при нагреве, что сильно усложняет его обработку давлением. В то же время изделия из молибдена и его сплавов используются для изготовления ответственных изделий, работающих в экстремальных условиях, при которых наличие деформационных микродефектов является недопустимым.

## Материал и методы исследования

Исследовали технически чистый молибден марки МЧВП, полученный по слитковой технологии с использованием вакуумно-дугового переплава. Образцы из молибдена МЧВП изготавливали из прутков  $\varnothing 24$  мм, полученных после стадии горячей деформации.

В работах [1, 4, 5, 6, 8] было обосновано применение техники высоких давлений для определения диаграммы пластичности (3), что позволяет получать адекватные данные о пластичности в области сжимающих напряжений, характерных для процессов обработки металлов давлением. С тех пор было проведено большое количество исследований пластичности при комнатной температуре, например [1,8]. Создание экспериментальной техники высоких давлений с возможностью нагрева образцов до  $1100^\circ\text{C}$  [5] позволило включить в число исследуемых труднодеформируемые материалы.

Пределные свойства в условиях циклического знакопеременного деформирования определяли величиной  $a_0 = 1/\gamma$  из формулы [1]

$$a = a_0^{1+0,238k}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – показатель Менсона–Кохфина из теории малоциклового усталости.

Залечивание поврежденности при термической обработке изучали в экспериментах по двухстадийной деформации в соответствии с методикой [1, 8, 7]. На первом этапе партию цилиндрических образцов подвергали растяжению со степенью деформации сдвига  $0 < \Lambda_1 < \Lambda_p$ . Внесенная при этом поврежденность составляла  $0 < \omega_1 < 1$ . Затем деформированные образцы отжигали в вакууме при температурах  $800$  и  $1050^\circ\text{C}$  с выдержкой  $1$  ч, уменьшая накопленную поврежденность на величину  $\Delta\omega$ . Далее образцы растягивали до разрыва. При деформации на второй стадии  $\Lambda_2$  в образец вносится поврежденность  $\omega_2$ . Расчет поврежденности на каждой из стадий растяжения осуществляли по формуле (1). Тогда величина залечивания поврежденности  $\Delta\omega$  может быть определена из условия разрушения  $\omega_1 - \Delta\omega + \omega_2 = 1$ .

## Результаты исследования и их обсуждение

Деформационные свойства определяли испытанием цилиндрических и плоских образцов. Цилиндрические образцы имели следующие размеры рабочей части: диаметр  $4,0 \pm 0,05$  мм, длина  $20,0 \pm 0,5$  мм. Плоские образцы имели размеры рабочей части: ширина  $8,0 \pm 0,2$  мм, толщина  $0,50 \pm 0,05$  мм, длина  $25 \pm 1$  мм.

Диаграммы пластичности, устанавливающие связь между пластичностью металла и показателями напряженного состояния, строили по результатам механических испытаний образцов на оригинальной установке, подробно описанной в [5]. Величина давления в экспериментах варьировалась от атмосферного до  $1$  ГПа, при температурах испытаний  $500$  и  $900^\circ\text{C}$  и скорости растяжения  $10$  мм/мин. Размеры образцов до и после испытания измеряли на инструментальном микроскопе с точностью  $\pm 0,01$  мм.

Диаграмму пластичности при постоянном значении  $\mu_\sigma$  аппроксимировали экспоненциальной зависимостью в виде

$$\Lambda_p = c_1 \exp(-c_2 k), \quad (6)$$

где  $c_1, c_2$  – эмпирические коэффициенты.

Из рассмотрения диаграмм пластичности на рис. 1 видно, что на пластичность исследованного материала существенное влияние оказывает вид напряженного состояния, характеризуемый параметром Лоде. Рост пластичности при температуре 500°C с увеличением доли сжимающих напряжений происходит более интенсивно в условиях осесимметричного растяжения, характеризуемого параметром Лоде  $\mu_\sigma = -1$ , чем при плоской деформации ( $\mu_\sigma = 0$ ). При температуре 900°C влияние показателя  $\mu_\sigma$

на пластичность также весьма существенно, однако оно не носит столь резко выраженный характер при увеличении сжимающих напряжений.

Интересно отметить, что для исследованного материала влияние показателя Лоде на пластичность сильнее влияния температуры. Так, из рис. 1 видно, что повышение температуры испытания с 500°C (кривая 2) до 900°C (кривая 4) практически не влияет на пластичность молибдена МЧВП при  $\mu_\sigma = -1$ . В то же время при 500°C переход от плоского напряженного состояния (кривая 1) к осесимметричному (кривая 2) вызывает рост пластичности больший, чем увеличение температуры испытания от 500 до 900°C (кривые 1 и 3 соответственно) при осесимметричном нагружении.

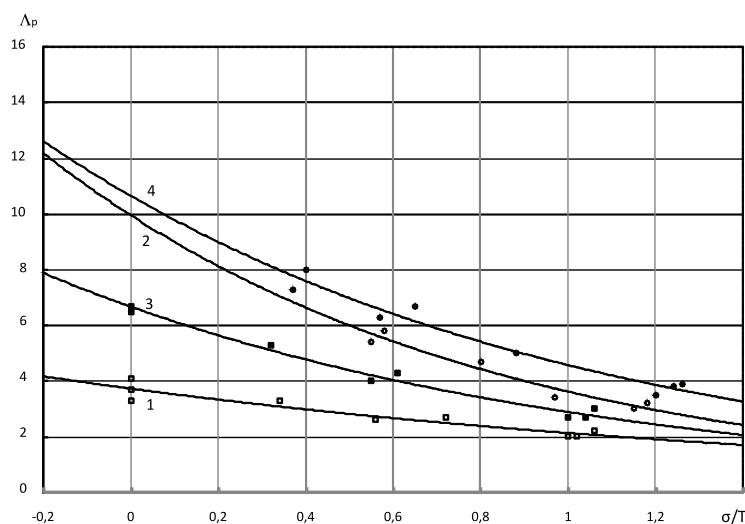


Рис. 1. Диаграммы пластичности молибдена МЧВП при:  
1 – 500°C,  $\mu_\sigma = 0$ ; 2 – 500°C,  $\mu_\sigma = -1$ ; 3 – 900°C,  $\mu_\sigma = 0$ ; 4 – 900°C,  $\mu_\sigma = -1$

Исследование пластичности в условиях знакопеременной деформации показало, что коэффициент  $a_0 = 1,57$ , тогда как для металлов обычно  $a_0 > 2$  [1]. Столь малое значение  $a_0$  можно связать с повышенной склонностью молибдена к расслоению, которое наибольшим образом проявляется при знакопеременной деформации. С повышением температуры величина  $a_0$  вначале возрастает, а затем, достигнув максимума, снижается, как это видно из рис. 2.

Диаграммы залечивания поврежденности приведены на рис. 3. Видно, что отжиг приводит к видимому снижению остаточной поврежденности по сравнению с исходной, однако полностью поврежденность не устраняется. Подобный вид диаграмм [8] является характерным для процесса залечивания деформационных дефектов, контролируемого процессами возврата (рас-

сасывание дислокационных скоплений, схлопывание упругих микротрещин и др.). Полное залечивание деформационных дефектов на стадии обратимой поврежденности наблюдается только при температурах выше температуры рекристаллизации, когда интенсифицируется механизм «пора на стоке» при прохождении границы зерна через микродефект [2, 3]. При температуре отжига 1050°C наблюдается частичная рекристаллизация, что вызывает снижение остаточной поврежденности, но по указанным выше причинам она происходит не полностью. Используя результаты исследований [1, 7], из анализа диаграмм залечивания можно определить предельное значение поврежденности  $\omega_1 = \omega^*$ , свыше которой в деформируемом металле образуются микродефекты, отрицательным образом сказывающиеся на таких важных

характеристиках, как трещиностойкость, радиационная стойкость, циклическая долговечность и др. Это предельное значение

поврежденности соответствует резкому излому хода диаграмм залечивания и для исследованного молибдена МЧВП  $\omega^* \approx 0,35$ .

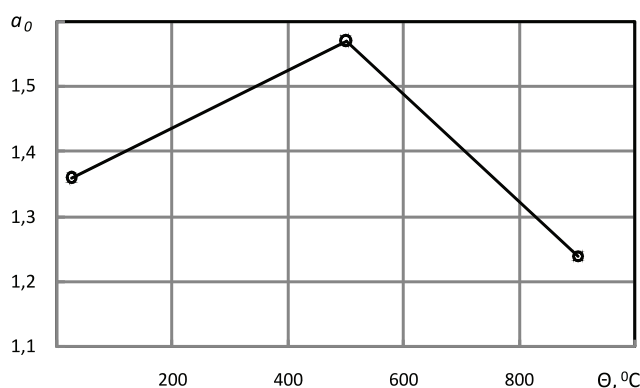


Рис. 2. Влияние температуры испытаний на показатель  $a_0$

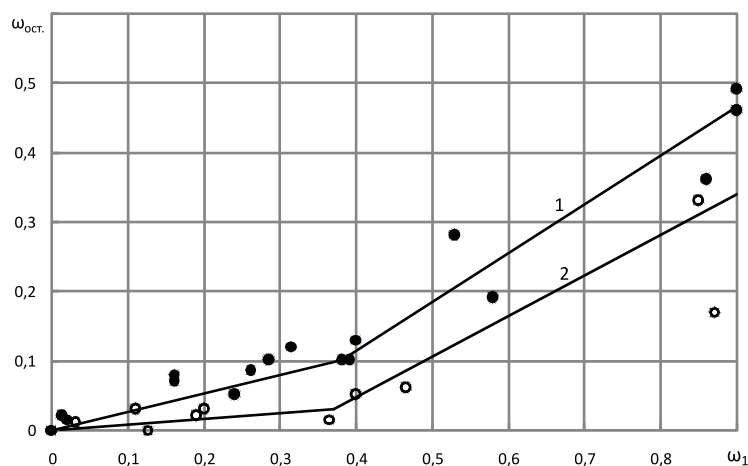


Рис. 3. Залечивание поврежденности при отжиге с температурой: 1 – 800°C; 2 – 1050°C

Результаты исследований могут быть использованы для расчета накопления поврежденности при деформациях с промежуточными термическими обработками.

### Выводы

Получены определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена марки МЧВП при температурах 500 и 900°C, используемых при его обработке давлением.

Установлено, что на пластичность исследованного материала существенное влияние оказывает вид напряженного состояния при деформировании, характеризуемый показателем Луде  $\mu_\sigma$ ; максимальным образом это влияние проявляется при температуре испытаний 500°C в области сжимающих напряжений, а наименьшим при

температуре испытания 500°C в области интенсивных растягивающих напряжений.

Сплавы молибдена характеризуются низким по сравнению с другими металлами уровнем деформируемости при знакопеременной деформации, что может быть связано с их склонностью к возникновению трещин расслоения; наилучшую деформируемость в этих условиях исследованный материал имеет при температуре 500°C, но при повышении температуры деформируемость при знакопеременной деформации резко уменьшается.

В результате исследования залечивания деформационной поврежденности при термической обработке определено предельное значение поврежденности  $\omega^* = 0,35$ , при превышении которого в деформируемом металле образуются микродефекты,

которые не устраняются полностью при термообработке и могут отрицательным образом сказываться на механических свойствах и эксплуатационных характеристиках изделий.

*Работа выполнена по программе фундаментальных исследований № 25 Президиума РАН при финансовой поддержке УрО РАН (проект 12-П-1-1027).*

#### Список литературы

1. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Metallurgija, 1984. – 144 с.
2. Вакуумная металлургия тугоплавких металлов и твердых сплавов / М.В. Мальцев [и др.]. – М.: Metallurgija, 1981. – 272 с.
3. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 252 с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Metallurgija, 1970. – 230 с.
5. Методики определения технологических свойств металла и его отдельных составляющих в условиях сложного нагружения / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.П. Швейкин, А.В. Нестеренко // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 1995. – № 1. – С. 42–49.
6. Пластичность и разрушение / под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Metallurgija, 1977. – 337 с.
7. Смирнов С.В., Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Исследование пластического разрыхления металла и заживление деформационных дефектов при отжиге // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49, вып. 2. – С. 389–393.
8. Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 255 с.

#### References

1. Bogatov A.A., Mizhirickij O.I., Smirnov S.V. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgija. 1984. 144 p.
3. Vakuumnaja metallurgija tugoplavkih metallov i tverdyh splavov / M.V. Mal'cev [i dr.]. M.: Metallurgija, 1981. 272 p.
3. Geguzin Ja.E. Makroskopicheskie defekty v metallah. M.: Metallurgizdat, 1962. 252 p.
4. Kolmogorov V.L. Naprijazhenija, deformacii, razrushenie. M.: Metallurgija. 1970. 230 p.
5. Metodiki opredelenija tehnologicheskikh svojstv metalla i ego otdel'nyh sostavljajuwih v uslovijah slozhnogo nagruzenija / A.A. Bogatov, S.V. Smirnov, V.P. Shvejkin, A.V. Nesterenko // Izvestija VUZov. Cvetnaja metallurgija. 1995. no. 1. pp. 42–49.
6. Plastichnost' i razrushenie / pod red. V.L. Kolmogorova. M.: Metallurgija, 1977. 337 p.
7. Smirnov S.V., Bogatov A.A., Kolmogorov V.L. Issledovanie plasticheskogo razryhlenija metalla i zalechivanie deformacionnyh defektov pri otzhige // Fizika metallov i metallovedenie. 1980. T. 49, vyp. 2. pp. 389–393.
8. Smirnov S.V., Shveykin V.P. Plastichnost' i deformiruemost' uglerodistyh stalej pri obrabotke davleniem. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 255p.

#### Рецензенты:

Орлов Г.А., д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением, Институт материаловедения и металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург;

Залазинский А.Г., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией системного моделирования, Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук УрО РАН (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.