

УДК 621.7.011

DOI dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕДНОЙ КАТАНКИ М00К

© 2015 г. Д.И. Вичужанин, С.Е. Шихов, С.В. Смирнов, Р.В. Чурбаев

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 15.10.13 г., подписана в печать 03.09.14 г.*

Получена диаграмма пластичности медной катанки в зависимости от коэффициента напряженного состояния ( $k$ ) и ко-ээффициента Лодэ–Надаи ( $\mu_\sigma$ ). Область использования этой диаграммы для расчетов поврежденности ограничивается значениями  $k < 1,4$ ;  $-1 < \mu_\sigma < 0$ . Для построения диаграммы пластичности проводились испытания на кручение цилиндрических образцов, на растяжение цилиндрических и плоских образцов на воздухе и в камере с регулируемым давлением жидкости, которые варьировались от 49 до 375 МПа. Полученная диаграмма пластичности в дальнейшем будет служить для расчетов поврежденности медной катанки в процессах волочения, по результатам которых будут выработаны рекомендации по снижению обрывности проволоки при волочении.

**Ключевые слова:** диаграмма пластичности, модель поврежденности, техника высоких давлений.

**Для цитирования:** Вичужанин Д.И., Шихов С.Е., Смирнов С.В., Чурбаев Р.В. Влияние напряженного состояния на предельную пластичность медной катанки М00К // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 5. С. 39–45.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45.

**Vichuzhanin D.I., Shikhov S.E., Smirnov S.V., Churbaev R.V.**

*Influence of the stressed state on the limiting plasticity of M00K copper rolled wire*

A fracture locus of copper rolled wire depending on the stressed-state coefficient ( $k$ ) and Lode–Nadai coefficient ( $\mu_\sigma$ ) is constructed. The region of using this fracture locus to calculate the damage is limited by values  $k < 1,4$  and  $-1 < \mu_\sigma < 0$ . To construct the fracture locus, we performed twisting tests of cylindrical samples and tension tests of cylindrical and plane samples in air and in a chamber with a controlled liquid pressure, which was varied from 49 to 375 MPa. The constructed fracture locus will be further used for the calculations of damage of copper rolled wire in drawing processes, by the results of which, recommendations for lowering the wire breakage during drawing will be elaborated.

**Keywords:** fracture locus, damage model, high-pressure technique.

**Citation:** Vichuzhanin D.I., Shikhov S.E., Smirnov S.V., Churbaev R.V. Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya na predel'nyuyu plastichnost' mednoi kataniki M00K. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 5. P. 39–45. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45.

## Введение

В настоящее время в производстве медной проволоки наблюдается тенденция уменьшения конечного размера и увеличения производительности.

В связи с этим при волочении проволоки одной из наиболее важных проблем является ее обрывность. В работах [1–3] в качестве основных причин обрыв-

*Вичужанин Д.И.* – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИМАШ УрО РАН (620219, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). Тел.: (343) 375-35-96. Факс: (343) 374-53-30. E-mail: mmm@imach.uran.ru.

*Шихов С.Е.* – аспирант этого института. E-mail: invisible\_serg@mail.ru.

*Смирнов С.В.* – докт. техн. наук, зам. директора по науке этого института. Тел.: (343) 374-40-76. Факс: (343) 374-53-30. E-mail: svsv@imach.uran.ru.

*Чурбаев Р.В.* – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института физики металлов УрО РАН (620219, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18). Тел.: (343) 378-38-26. E-mail: churbaevravil@gmail.ru.

ности медной проволоки рассматриваются инородные включения и значительные растягивающие напряжения.

Выявление механизма обрыва проволоки — весьма актуальная задача, решение которой позволит в дальнейшем разработать мероприятия по снижению вероятности наступления такой ситуации. На наш взгляд, обрывность проволоки в значительной мере зависит от деформационных свойств медной катанки, которые характеризуются различными параметрами напряженно-деформированного состояния. Так, в работах [4—6] показано существенное влияние гидростатического давления на деформационную способность металла. В качестве критерия, позволяющего оценить деформационную способность материала, может быть использована величина поврежденности. Впервые кинематические уравнения накопления поврежденности были предложены авторами [7] и [8]. В работе [9] применяется параметр поврежденности  $D$ , который прямо пропорционален эквивалентной пластической деформации и обратно пропорционален функции параметров напряженного состояния.

Феноменологические модели разрушения металлов при больших пластических деформациях были разработаны В.Л. Колмогоровым и представителями его научной школы [10—12]. Под поврежденностью понимается скалярный параметр  $\omega$  [12], который изменяется от 0 в начальный момент деформации до 1 при разрушении. В общем случае можно выделить два критических значения поврежденности:  $\omega^* = 0,2 \div 0,4$  и  $\omega^{**} = 0,6 \div 0,8$ . Если в результате деформации накопленная поврежденность находится в интервале  $0 < \omega < \omega^*$ , то при последующем отжиге наблюдается полное «залечивание» поврежденности. Если поврежденность соответствует интервалу  $\omega^* < \omega < \omega^{**}$ , то она залечивается не полностью, при этом после отжига ее накопление происходит с меньшей интенсивностью. Значения  $\omega^*$  и  $\omega^{**}$  не одинаковы для разных материалов.

В соответствии с теорией поврежденность  $\omega$  может быть определена по формуле

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

где  $\Lambda = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2}}$  — степе-

нь деформации сдвига;  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ ,  $\epsilon_{33}$  — главные деформации;  $\hat{B}(\Lambda)$  — функция, зависящая от степени

немонотонности процесса;  $\Lambda_p(k, \mu_\sigma)$  — степень деформации сдвига, накопленная образцом к моменту разрушения при механических испытаниях в условиях монотонного деформирования при постоянных на всем процессе деформирования величинах  $k$  и  $\mu_\sigma$ . Величина  $\Lambda_p$  является мерой пластичности металла, т.е. его способности подвергаться деформированию без разрушения. Пластичность  $\Lambda_p$  является функцией коэффициента напряженного состояния  $k$  и коэффициента Лоде—Надаи  $\mu_\sigma$ , которые можно определить по формулам

$$k = \frac{\sigma}{T}, \quad \mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1, \quad (2)$$

где  $\sigma = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$  — среднее нормальное напряжение;  $T = \sqrt{0,5 S_{ij} S_{ij}}$  — интенсивность касательных напряжений;  $S_{ij}$  — компоненты девиатора напряжений;  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  — главные напряжения. Совокупность параметров  $k$  и  $\mu_\sigma$  однозначно характеризует напряженное состояние при пластической деформации; кроме того, являясь безразмерными, они позволяют сопоставлять напряженное состояние материалов с различным уровнем прочностных свойств. Графическая интерпретация функции  $\Lambda_p(k, \mu_\sigma)$  называется диаграммой пластичности.

Целью работы являлось построение диаграммы пластичности медной катанки, которая позволит в дальнейшем выполнить расчеты поврежденности при волочении медной проволоки и выработать рекомендации по снижению ее обрывности.

## Материал для исследования и механические свойства

Была исследована медная катанка производства ЗАО СП «Катур-Инвест» (г. Верхняя Пышма), которая изготавливается из медных катодов марки М00К (содержание меди 99,99 %) производства ОАО «Урал-электромедь» (г. Верхняя Пышма).

Для определения механических свойств катанки проводились испытания цилиндрических образцов на растяжение на испытательной установке INSTRON 8801. По результатам испытаний на растяжение была построена кривая упрочнения  $\sigma_S$ — $\epsilon$ . Сопrotивление деформации до момента начала образования шейки определяли по формуле

$$\sigma_S = F_i / A_i, \quad (3)$$

где  $F_i$  — текущее усилие нагружения,  $A_i$  — текущая площадь поперечного сечения образца.

После образования шейки сопротивление деформации находили по формуле Давиденкова—Спиритоновой [13]:

$$\sigma_s = \frac{F_i}{A_i \left(1 + \frac{d_i}{8R_i}\right)}, \quad (4)$$

где  $d_i/R_i$  — безразмерный параметр, характеризующий форму шейки образца;  $d_i$  — текущий минимальный диаметр образца;  $R_i$  — текущий минимальный радиус кривизны образующей линии в шейке. Параметры  $d$  и  $R$  определяли в процессе испытания при помощи бесконтактного оптического комплекса «StrainMaster» для анализа формы, полей перемещений и деформаций.

Величину  $\varepsilon$  при растяжении вычисляли следующим образом:

$$\varepsilon = 2 \ln(d_0/d_i), \quad (5)$$

где  $d_0$  — начальный диаметр образца. По результатам расчетов кривая упрочнения была аппроксимирована полиномом:

$$\sigma_s = 0,2\varepsilon^5 - 5,4\varepsilon^4 + 53,5\varepsilon^3 - 244,7\varepsilon^2 + 626,6\varepsilon + 190,75 \text{ [МПа]}. \quad (6)$$

## Построение диаграммы пластичности

Для определения функции  $\Lambda_p = \Lambda_p(k, \mu_\sigma)$  были выполнены испытания на кручение, растяжение цилиндрических и плоских образцов при атмосферном давлении, а также в камере с регулируемым давлением жидкости. Использование техники высоких давлений [12] позволяет в широком диапазоне варьировать коэффициент напряженного состояния  $k$ . Проведение различных видов испытаний дает возможность варьировать коэффициент Лоде—Надаи  $\mu_\sigma$ .

### 1. Испытания на кручение цилиндрических образцов

В данном виде испытаний  $\mu_\sigma = 0$  и  $k = 0$ , и эти коэффициенты неизменны на протяжении всего процесса испытания. По результатам 38 стандартных испытаний на кручение определяли накопленную степень деформации сдвига  $\Lambda_p$  (пластичность) на боковой поверхности образца в момент разрушения. Была использована формула

$$\Lambda_p = \sqrt{3}\varepsilon = QR/l, \quad (7)$$

где  $Q$  — угол закручивания, рад;  $R$  — радиус образца, мм;  $l$  — рабочая длина образца.

Выполнен статистический анализ выборки полученных значений [14]. В рамках статистического анализа определены:

— среднее значение накопленной степени деформации сдвига:

$$\bar{\Lambda}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Lambda_{p_i};$$

— стандартное отклонение:  $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Lambda_{p_i} - \bar{\Lambda}_p)^2}$ ,

а также выполнен отсев грубых погрешностей с использованием критерия Стьюдента.

По результатам статистического анализа установлено среднее значение пластичности при кручении:  $\bar{\Lambda}_p = 7,28$ .

### 2. Испытания на растяжение цилиндрических образцов на воздухе и в камере с регулируемым давлением жидкости

Испытания на воздухе выполняли с помощью испытательной установки INSTRON 8801.

Испытания под давлением жидкости проводили с использованием испытательной установки высокого давления [15].

В этих испытаниях коэффициент  $\mu_\sigma = -1$  на протяжении всего процесса испытания. Коэффициент напряженного состояния меняется в интервале  $-4 < k < 1,5$  в зависимости от прикладываемого гидростатического давления. По результатам испытаний были получены зависимости изменения коэффициента напряженного состояния  $k$  от деформации в процессе испытания вплоть до разрушения (рис. 1).

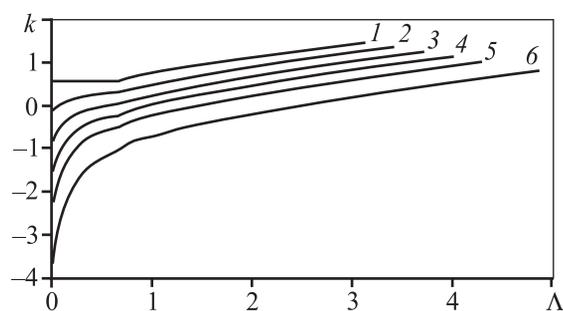


Рис. 1. Изменение показателя напряженного состояния  $k$  в процессе деформации цилиндрических образцов при различных давлениях жидкости в испытательной камере  $p$ , МПа: 1 — 0,1 (на воздухе); 2 — 49; 3 — 98; 4 — 147; 5 — 196; 6 — 294

Коэффициент  $k$  определяли по формуле [16]

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{3d}{4R} \right) - \frac{\sqrt{3}p}{\sigma_s}, \quad (8)$$

где  $p$  — давление в испытательной камере. Величину  $\sigma_s$  рассчитывали с помощью (6), отношение  $d/R$  — по уравнению [16]:

$$d/R = (\Lambda - \Lambda_n)^{0,81}, \quad (9)$$

где  $\Lambda_n$  — степень деформации сдвига, соответствующая моменту начала образования шейки.

Так как давление жидкости в камере не влияет на формообразование [4], то величина  $\Lambda_n$  должна быть одной и той же при испытаниях на воздухе и под различными давлениями жидкости. Поэтому ее определяли по результатам испытаний образцов на воздухе с использованием бесконтактного оптического комплекса «StrainMaster». Было установлено, что  $\Lambda_n = 0,658$ .

### 3. Испытания на растяжение плоских образцов на воздухе и в камере с регулируемым давлением жидкости

В данном виде испытаний коэффициент Лоде—Надаи и коэффициент напряженного состояния изменялись в следующих интервалах:  $-1 < \mu_\sigma < 0$ ;  $-4 < k < 1,4$ . Так как при испытаниях плоских образцов в камере с регулируемым давлением жидкости оценить напряженное состояние достаточно сложно, при этом аналитических решений, подобных формуле (8), обнаружено не было, то величины  $k$  и  $\mu_\sigma$  определяли по результатам моделирования процесса методом конечных элементов в среде ANSYS. Достоверность результатов моделирования анализировалась путем сравнения энергосиловых параметров процесса. Отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных не превысило 5 %.

На рис. 2 приведены значения  $k$  и  $\mu_\sigma$ , полученные по результатам моделирования растяжения до момента разрушения. Так как величина  $\mu_\sigma$  не зависит от первого инварианта тензора напряжений, а соответственно, и от давления жидкости в испытательной камере, то все графики на рис. 2, *a* сливаются в одну линию.

По результатам испытаний на растяжение цилиндрических образцов с помощью установки высокого давления было установлено, что при некотором давлении жидкости в испытательной камере дан-

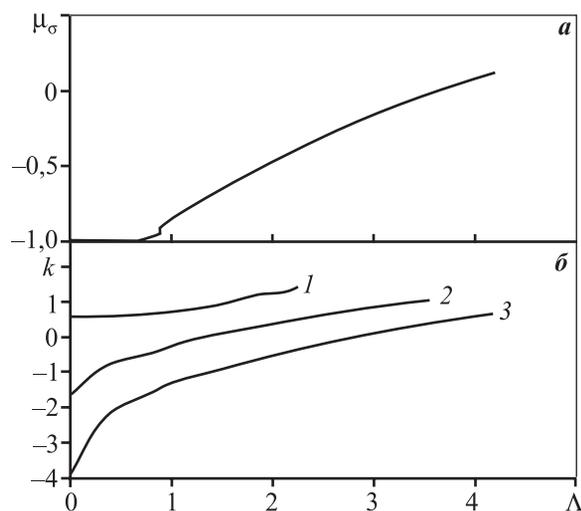


Рис. 2. Изменение показателя Лоде—Надаи (*a*) и показателя напряженного состояния (*b*) в процессе деформации плоских образцов при различных давлениях жидкости в испытательной камере  $p$ , МПа: 1 — 0,1 (на воздухе); 2 — 250; 3 — 375

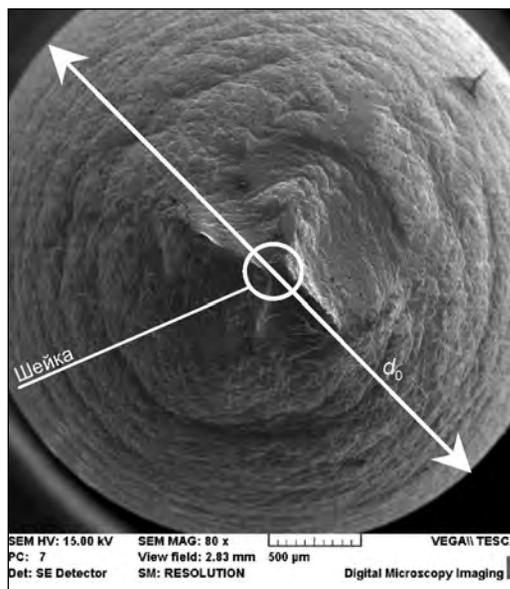


Рис. 3. Изображение со сканирующего электронного микроскопа места разрушения медного образца

ные образцы пластически деформировались до момента, пока не происходило физическое разделение частей образца в месте разрушения (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что при некотором давлении жидкости (при некотором значении  $k^*$ ) материал во время испытания переходит в состояние неограниченной пластичности. Поэтому функция  $\Lambda_p = \Lambda_p(k, \mu_\sigma)$  должна иметь вертикальную асимптоту при некотором значении  $k^*$ . Тогда для случая

испытаний цилиндрических образцов (на протяжении всего испытания  $\mu_\sigma = -1$ , соответственно  $\Lambda_p$  не зависит от  $\mu_\sigma$ ) функция  $\Lambda_p = \Lambda_p(k)$  может быть описана формулой

$$\Lambda_p = \frac{a}{k - k^*} + m, \quad (10)$$

где  $a$ ,  $m$  и  $k^*$  — эмпирические коэффициенты. Определим данные коэффициенты, воспользовавшись результатами экспериментов, приведенными на рис. 1. Для этого необходимо рассчитать поврежденность для каждого проведенного эксперимента по формуле (1). Чтобы исключить из расчетов функцию  $\hat{B}(\Lambda)$ , условно разделим весь процесс деформирования на 100 равных участков, на которых деформацию можно считать монотонной. В соответствии с принципом линейного суммирования поврежденности [12] формула (1) может быть представлена в виде

$$\omega_j = \sum_{i=1}^{100} \Delta\omega_i = \sum_{i=1}^{100} \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_{p_i}}. \quad (11)$$

Далее выполняется варьирование коэффициентов  $a$ ,  $m$  и  $k^*$  с целью минимизации функционала квадратичных отклонений поврежденностей от единицы:

$$\sum_{i=1}^6 (1 - \omega_i)^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

где  $i$  — номер образца на рис. 1.

Варьирование неизвестных коэффициентов  $a$ ,  $m$  и  $k^*$ , входящих в формулу (10), осуществлялось методом Хука—Дживса [17]. Так как в результате поиска можно попасть в локальный минимум функционала квадратичных отклонений (12), то была выбрана не одна начальная точка поиска, а некоторое их множество. И для каждой начальной точки поиска выполнялась процедура метода Хука—Дживса. При этом начальные значения неизвестных коэффициентов варьировались в интервале от 0 до 5 с шагом 0,5. В результате были получены значения неизвестных коэффициентов  $a = 0,487$ ,  $m = 2,79$  и  $k^* = -0,4$ . При этом функция (10) будет иметь вид

$$\Lambda_p = \frac{0,487}{k + 0,4} + 2,79. \quad (13)$$

Для общего случая деформирования формула (10) может быть записана в виде

$$\Lambda_p = \frac{a(\mu_\sigma)}{k - k^*(\mu_\sigma)} + m(\mu_\sigma), \quad (14)$$

где  $a(\mu_\sigma)$  и  $m(\mu_\sigma)$  — коэффициенты, зависящие от

схемы нагружения и являющиеся функциями  $\mu_\sigma$ ;  $k^*(\mu_\sigma)$  также является функцией  $\mu_\sigma$ .

Функции, входящие в уравнение (14), можно описать полиномами второй степени:

$$a(\mu_\sigma) = a_0 + a_1\mu_\sigma + a_2\mu_\sigma^2,$$

$$m(\mu_\sigma) = m_0 + m_1\mu_\sigma + m_2\mu_\sigma^2,$$

$$k^*(\mu_\sigma) = c_0 + c_1\mu_\sigma + c_2\mu_\sigma^2,$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  — эмпирические коэффициенты.

Зависимость  $k^*(\mu_\sigma)$  может быть упрощена, так как известно, что при  $\mu_\sigma = -1$  коэффициент  $k^*(\mu_\sigma = -1) = -0,4$ , отсюда

$$k^*(\mu_\sigma) = c_1(1 + \mu_\sigma) + c_2(\mu_\sigma^2 - 1) - 0,4. \quad (15)$$

Известно также, что при  $\mu_\sigma = 0$  и  $k = 0$  величина пластичности  $\bar{\Lambda}_p = 7,28$ . Подставив данные значения, а также выражение (15) в формулу (14), получим

$$m_0 = 7,28 - \frac{a_0}{0,4 - c_1 + c_2}. \quad (16)$$

При  $\mu_\sigma = -1$  величина  $\Lambda_p$  может быть определена по формуле (13). Подставив формулу (13) в левую часть выражения (14), а формулы (15) и (16) при  $\mu_\sigma = -1$  — в ее правую часть, получим

$$m_1 = \frac{a_0 - a_1 + a_2 - 0,487}{k + 0,4} - \frac{a_0}{0,4 - c_1 + c_2} + m_2 + 4,49. \quad (17)$$

После проведения преобразований формула (14) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Lambda_p = & \frac{a_0 + a_1\mu_\sigma + a_2\mu_\sigma^2}{k - c_1(1 + \mu_\sigma) - c_2(\mu_\sigma^2 - 1) + 0,4} + \\ & + (1 + \mu_\sigma) \left( m_2\mu_\sigma - \frac{a_0}{0,4 - c_1 + c_2} + 7,28 \right) + \\ & + \mu_\sigma \left( \frac{a_0 - a_1 + a_2 - 0,487}{k + 0,4} - 2,79 \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  и  $m_2$ , входящие в формулу (18), были найдены путем минимизации функционала квадратичных отклонений от единицы поврежденностей, рассчитанных для испытанных на воздухе и в камере с регулируемым давлением жидкости плоских образцов:

$$\sum_{i=1}^3 (1 - \omega_i)^2 \rightarrow \min, \quad (19)$$

где  $i$  — номер образца на рис. 2.

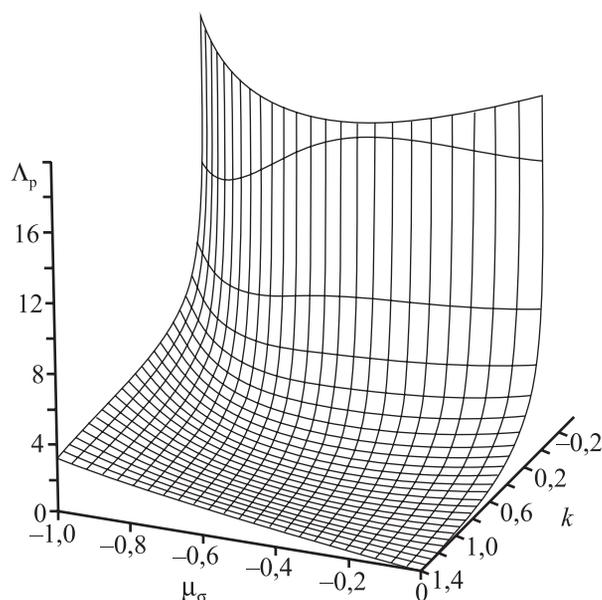


Рис. 4. Диаграмма пластичности катанки М00К

Для расчета поврежденности весь процесс деформирования условно делился на 100 равных частей, в которых деформацию можно считать монотонной. Затем поврежденность рассчитывалась по формуле (11). Варьирование неизвестных коэффициентов, входящих в формулу (18), осуществлялось методом Хука—Дживса [17]. Так как в результате поиска можно попасть в локальный минимум функционала квадратичных отклонений (19), то была выбрана не одна начальная точка поиска, а некоторое их множество. И для каждой начальной точки поиска выполнялась процедура метода Хука—Дживса. При этом начальные значения неизвестных коэффициентов варьировались в интервале от 0 до 5 с шагом 0,5. В результате были получены значения неизвестных коэффициентов  $a_0 = 1,4$ ;  $a_1 = -0,32$ ;  $a_2 = 5,65$ ;  $c_1 = 0,28$ ;  $c_2 = 0,065$  и  $m_2 = -6,84$ . При этом функция (14) будет иметь вид

$$\Lambda_p = \frac{1,4 - 0,32\mu_\sigma + 5,65\mu_\sigma^2}{k - 0,28\mu_\sigma - 0,065\mu_\sigma^2 + 0,185} - 6,84\mu_\sigma^2 - 9,917\mu_\sigma + \frac{6,883\mu_\sigma}{k + 0,4} - 0,287. \quad (20)$$

На рис. 4 изображена диаграмма предельной пластичности медной катанки, построенная на основании формулы (20). Диаграмма позволит в дальнейшем выполнять расчеты поврежденности при деформировании катанки.

## Заключение

Получена диаграмма пластичности медной катанки в зависимости от коэффициента напряженного состояния и коэффициента Лодэ—Надаи. Она может использоваться при условии изменения в процессе деформирования указанных коэффициентов:  $-1 < \mu_\sigma < 0$ ;  $k < 1,4$ .

В дальнейшем полученная диаграмма пластичности будет полезна для расчетов поврежденности медной катанки в процессах волочения, по результатам которых будут выработаны рекомендации по снижению обрывности проволоки при волочении.

Работа выполнена в соответствии с планом работ по программе Президиума РАН № 25 (проект 12-П-1-1027) и гранта РФФИ №13-08-96091.

## Литература

1. Перлин И.Л. Теория волочения. М.: Metallurgy, 1971.
2. Norasethasopon S., Yoshida K. Finite-element simulation of inclusion size effects on cooper shaped-wire drawing // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 422. P. 252–258.
3. Пугачева Н.Б. Структура и свойства деформируемых легированных латуней. Екатеринбург: УрО РАН, 2012.
4. Bridgman P.W. Studies in large plastic flow and fracture. N.Y.: McGraw-Hill, 1952.
5. Губкин С.И. Деформируемость металлов. М.: Metallurgizdat, 1953.
6. Смирнов-Аляев Г.А., Розенберг В.М. Теория пластических деформаций металлов. М., Л.: Машгиз, 1956.
7. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Докл. АН СССР. Сер. ОТН. 1958. No. 8. С. 67–75.
8. Работнов Ю.Н. Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
9. Yuanli B., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // Int. J. Plasticity. 2008. Vol. 24. P. 1071–1096.
10. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Metallurgy, 1970.
11. Smirnov S.V. Accumulation and healing of damage during plastic metal forming: simulation and experiment // Key Eng. Mater. 2013. Vol. 528. P. 61–69.
12. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Metallurgy, 1984.
13. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. Analysis of the state of

stress in the neck of a tensile test specimen // *Proc. ASTM*. 1946. Vol. 46. P. 1147–1158.

14. *Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L.* Probability and statistics for engineers and scientists. 6-th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
15. *Чурбаев Р.В., Колмогоров В.Л., Талуц Г.Г., Буркин С.П.* Установка сложного нагружения для исследования материалов при высоких регулируемых давлениях // *Завод. лаб.* 1989. Т. 55. No. 9. С. 98–99.
16. *Смирнов С.В., Швейкин В.П.* Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
17. *Hooke R., Jeeves T.A.* Direct search solution of numerical and statistical problems // *J. ACM*. 1961. Vol. 8. P. 212–229.

## References

1. *Perlin I.L.* Teoriya volocheniya [Drawing theory]. Moscow: Metallurgiya, 1971.
2. *Norasethasopon S., Yoshida K.* Finite-element simulation of inclusion size effects on cooper shaped-wire drawing. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 422. P. 252–258.
3. *Pugacheva N.B.* Struktura i svoystva deformiruemyykh legirovannykh latunei [Structure and properties of the deformable alloyed brass]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012.
4. *Bridgman P.W.* Studies in large plastic flow and fracture. N.Y.: McGraw-Hill, 1952.
5. *Gubkin S.I.* Deformiruemost' metallov [Deformability of metals]. Moscow: Metallurgizdat, 1953.
6. *Smirnov-Alyayev G.A., Rozenberg V.M.* Teoriya plasticheskikh deformatsii metallov [Theory of plastic deformation of metals]. Moscow, Leningrad: Mashgiz, 1956.
7. *Kachanov L.M.* O vremeni razrusheniya v usloviyakh pol-

zuchesti [About the time of destruction under creep conditions]. *Dokl. AN SSSR. Ser. OTN*. 1958. No. 8. P. 67–75.

8. *Rabotnov Yu.N.* Voprosy prochnosti materialov i konstrukttsii [Questions of strength of materials and structures]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1959.
9. *Yuanli B., Wierzbicki T.* A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *Int. J. Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1071–1096.
10. *Kolmogorov V.L.* Napryazheniya, deformatsii, razrushenie [Stresses, strains, fracture]. Moscow: Metallurgiya, 1970.
11. *Smirnov S.V.* Accumulation and healing of damage during plastic metal forming: simulation and experiment. *Key Eng. Mater.* 2013. Vol. 528. P. 61–69.
12. *Bogatov A.A., Mizhiritskii O.I., Smirnov S.V.* Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem [Resource of metals plasticity under metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1984.
13. *Davidenkov N.N., Spiridonova N.I.* Analysis of the state of stress in the neck of a tensile test specimen. *Proc. ASTM*. 1946. Vol. 46. P. 1147–1158.
14. *Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L.* Probability and statistics for engineers and scientists. 6-th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
15. *Churbaev R.V., Kolmogorov V.L., Taluts G.G., Burkin S.P.* Ustanovka slozhnogo nagruzheniya dlya issledovaniya materialov pri vysokikh reguliruemyykh davleniyakh [Aggregate of complicated loading for research of materials under high controlled pressure]. *Zavod. Lab.* 1989. Vol. 55. No. 9. P. 98–99.
16. *Smirnov S.V., Shveikin V.P.* Plastichnost' i deformiruemost' uglerodistykh staley pri obrabotke davleniem [Plasticity and deformability of carbon steels under plastic forming]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009.
17. *Hooke R., Jeeves T.A.* Direct search solution of numerical and statistical problems. *J. ACM*. 1961. Vol. 8. P. 212–229.