

# МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИАГРАММЫ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ МОНОТОННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин, А.В. Нестеренко

## PLASTICITY DIAGRAM PARAMETRICAL IDENTIFICATION METHOD UNDER MONOTONOUS DEFORMATION

S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, A.V. Nesterenko

Затрагивается актуальная тема деформируемости металлов при обработке давлением. Для оценки величины накопленной поврежденности при пластической обработке в данной работе использовалась известная модель накопления поврежденности. Для того чтобы воспользоваться моделью, необходимо экспериментальное определение предельной степени деформации материала в зависимости от параметров, характеризующих напряженное состояние процесса. С применением экспериментов по деформированию образцов в условиях гидростатического давления среды и процедуры параметрической идентификации процесса накопления поврежденности разработана методика получения такой зависимости на примере стали 20.

*Ключевые слова:* модель поврежденности при пластической деформации, поврежденность металла, пластичность, деформируемость, гидростатическое давление, параметр Лоде, кривая напряжение – деформации.

The paper deals with the urgent theme of metal deformability in metal forming processes. The known damage accumulation model was used for estimation of the accumulated damage value under plastic deformation. The experimental determination of extreme material deformation, which depends on stress state parameters, is necessary for the model utilization. The plasticity diagram construction method for 0.2 pct carbon steel 20 as an example was developed by using the parametrical identification procedure and tests of sample deformation under hydrostatic pressure.

*Keywords:* damage model under plastic deformation, metal damage, plasticity, deformability, hydrostatic pressure, Lode parameter, stress – strain curve.

Важное место при пластической обработке металлов занимают проблемы деформируемости обрабатываемого материала. В качестве критерия, позволяющего оценить деформационную способность материала, может быть использована величина поврежденности  $\omega$  [1]. 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 качественно оценить морфологические особенности микродефектов, возникающие при пластической деформации металлов, если воспользоваться рекомендациями [2].

Прогнозировать развитие поврежденности и ускорить процесс выбора путей оптимизации способов и режимов деформационной обработки можно с помощью моделей механики поврежденности. В представленной работе использовались модельные представления научной школы В.Л. Колмогорова [1, 2].

Согласно этим представлениям при простом

нагружении поврежденность определяется по формуле

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

где  $\Lambda_p(k, \mu_\sigma)$  – функция, аппроксимирующая зависимость пластичности от напряженного состояния. Графическая интерпретация этой функции называется диаграммой пластичности.

Таким образом, под пластичностью понимается способность материала деформироваться при заданных постоянных условиях монотонного нагружения. В качестве параметра, характеризующего величину пластичности, принимается степень накопленной деформации сдвига в момент разрушения  $\Lambda_p$ . Напряженное состояние характеризуется показателем напряженного состояния  $k = \sigma/T$

и показателем Лоде–Надаи  $\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1$ ,

где  $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$  – среднее нормальное напряжение,  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  – главные напряжения,  $T$  – интенсивность касательных напряжений.

Совокупность этих параметров однозначно характеризует напряженное состояние при пластической деформации, кроме того, являясь безразмерными, они позволяют сопоставлять напряженное состояние материалов с различным уровнем прочностных свойств [1, 2]. Показатель  $k$  характеризует соотношение среднего уровня нормальных и касательных напряжений: при  $k > 0$  преобладают растягивающие напряжения, а при  $k < 0$  – сжимающие. Значение показателя  $\mu_\sigma = 0$  соответствует напряженному состоянию простого сдвига, а  $\mu_\sigma = \pm 1$  – соответственно условиям осесимметричного сжатия и растяжения.

Для построения диаграмм пластичности исторически использовались различные виды механических испытаний, в которых использовались образцы с различной формой поперечного сечения [3–9]. Например, для получения вида напряженного состояния, характеризуемого  $\mu_\sigma = 0$ , растягивали широкие плоские образцы, а для реализации напряженного состояния, характеризуемого  $\mu_\sigma = \pm 1$ , проводили испытания на осадку и растяжение цилиндрических образцов. Однако при растяжении плоских образцов напряженное состояние не соответствует простому сдвигу в процессе всего испытания, поскольку соотношение толщины и ширины образца при растяжении образца меняется, что было показано еще в работе [10]. При осадке и растяжении цилиндрических образцов осесимметричное сжатие, растяжение имеет место лишь до начала локализации деформации.

С развитием техники высоких давлений появилась возможность строить диаграммы пластичности по результатам механических испытаний образцов в камерах с регулируемым давлением жидкости, что позволило получать мягкие схемы напряженного состояния при различных значениях показателя Лоде, что характерно для процессов обработки давлением, применяемых в промышленности. Установки были снабжены испытательными камерами, в которых при деформировании образцов с различной формой поперечного сечения поддерживалось заданное гидростатическое давление жидкости [11–13].

Необходимо отметить, что в процессе испытаний на таких установках значение показателя  $k$  менялось согласно формуле [2]:

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{3d}{4R} \right) - \frac{\sqrt{3} \cdot p}{\sigma_S} \quad (2)$$

за счет изменения  $\sigma_S$  при деформационном упрочнении и параметра  $d/R$  за счет образования и развития шейки образца. Поэтому при построении диаграмм пластичности значениям  $\Lambda_p$  ставили в соответствие среднеинтегральные значения  $k$  за процесс испытаний при  $\mu_\sigma = 0$ , когда растягивали плоские образцы, и  $\mu_\sigma = -1$  при растяжении цилиндрических образцов.

В известных работах [2, 13, 14] диаграммы пластичности при постоянном значении  $\mu_\sigma$  аппроксимировали экспоненциальными зависимостями в виде

$$\Lambda_p = \chi \exp(-\eta k), \quad (3)$$

где  $\chi$  и  $\eta$  – эмпирические коэффициенты.

#### Методики и результаты экспериментальных исследований

Для более точной оценки изменения параметров  $k = \sigma/T$ ,  $\mu_\sigma$  и их влияния на предельную деформацию сдвига  $\Lambda_p$  при растяжении цилиндрических и плоских образцов в условиях гидростатического давления рабочей среды были проведены испытания на установке, конструкция которой описана в работе [13], и последующее конечно-элементное моделирование пластического течения металла при этих испытаниях с использованием программного комплекса ANSYS.

В качестве модельного материала была выбрана углеродистая сталь 20. Химический состав стали приведен в таблице. Методики проведения испытаний описаны в работе [2].

Химический состав стали 20 по ГОСТ 1050

Элемент	Массовые доли, %
Cr	0,062
Ni	0,059
Mn	0,42
Si	0,11
Cu	0,028
C	0,18
S	0,027
P	0,019

В экспериментах использовали цилиндрические образцы с размерами рабочей части: диаметр  $4 \pm 0,1$  мм, длина  $20 \pm 0,5$  мм. Плоские образцы имели размеры рабочей части: ширина  $4,0 \pm 0,2$  мм, толщина  $1 \pm 0,05$  мм, длина  $20 \pm 1$  мм.

Для определения кривой деформационного упрочнения стали проводили испытания цилиндрических образцов на растяжение в условиях атмосферного давления. Полученная зависимость описана формулой

$$\sigma_S = 267 + 309\Lambda^{0,689}. \quad (4)$$

По результатам экспериментов с цилиндрическими и плоскими образцами при давлениях рабочей среды в камере 300, 600, 900, 1150 МПа были определены значения степеней деформации сдвига в момент разрушения, необходимые при численном моделировании.

Адекватность полученных при моделировании результатов подтверждается сравнением контура натурального образца и контура, полученного расчетом при степени деформации сдвига, равной предельной для конкретных условий испытания. Контур образца после испытания определялся путем измерения поперечных размеров образца на

различном удалении от сечения, в котором произошло разрушение. При измерениях использовалась высокоточная бесконтактная оптическая система Strain Master. Пример сравнения расчетного и натурального контуров для плоского образца приведен на рис. 1. Погрешность расчета формоизменения при моделировании находится в пределах 10 %.

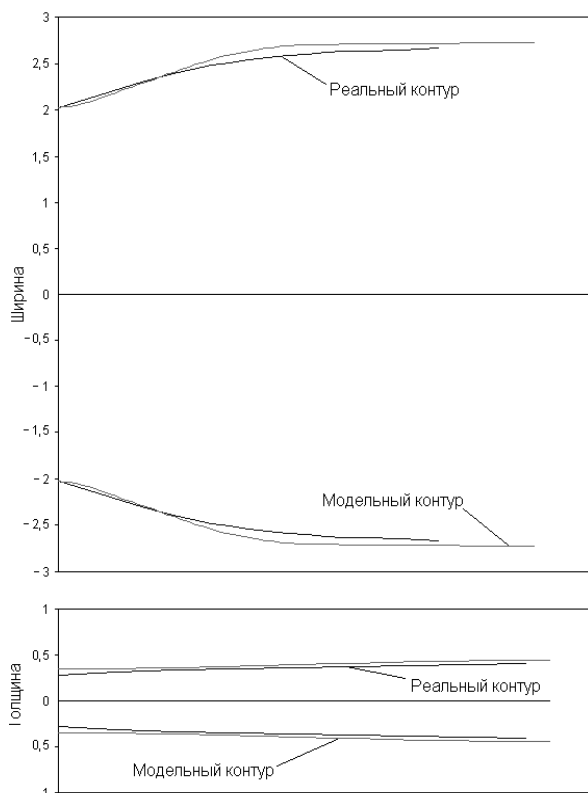


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования с размерами реальных образцов при растяжении плоского образца в месте локализации деформации

Результаты расчета показателей напряженного состояния в процессе деформации цилиндрических и плоских образцов под давлением приведены на рис. 2 и 3. Изменение показателей  $k = \sigma/T$  особенно существенно для испытаний при больших гидростатических давлениях, поскольку материал в этих условиях претерпевает большую деформацию до разрушения, существенно упрочняясь при сильно локализованной в минимальном сечении деформации. На изменение показателя  $\mu_\sigma$  при растяжении плоских образцов величина гидростатического давления практически не влияет, но  $\mu_\sigma$  изменяется от  $-1$  до  $0,5$  с ростом деформации.

Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод, что накопление поврежденности в испытанных образцах происходило при постоянно меняющемся напряженном состоянии. Таким образом, ставить в соответствие полученному в эксперименте значению предельной деформации сдвига некую пару параметров, определяющих напряженное состояние, является не со-

всем правильным. Зависимость (4) в данном случае является функционалом:

$$\Lambda_p = f(k, \mu_\sigma). \quad (5)$$

В общем случае (5) может быть аппроксимирована формулой из [2]:

$$\Lambda_p = a_0 + a_1\mu_\sigma + a_2\mu_\sigma^2, \quad (6)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  – неизвестные функции коэффициента напряженного состояния  $k$ . Функции зависят от свойств конкретного обрабатываемого материала. Определить эти функции можно путем параметрической идентификации зависимости (6). Например, в работе [15] процесс накопления поврежденности рассматривался как динамический объект. Автор подробно описывает процедуру идентификации предложенной им модели накопления поврежденности, записанной в дифференциальной форме. Отмечено, что при использовании параметрической идентификации, экспериментальные данные должны быть получены в опытах, когда параметры напряженного состояния существенно изменяются во времени в пределах одного испытания.

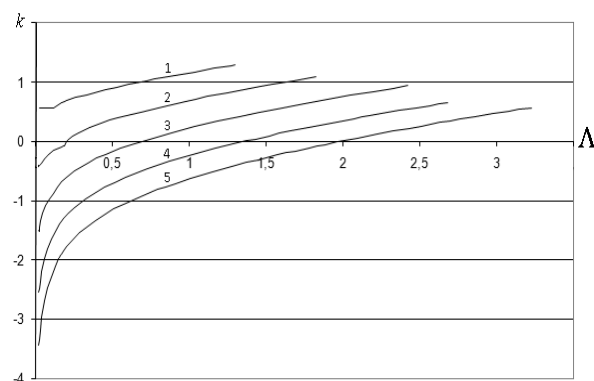


Рис. 2. Изменение показателя напряженного состояния  $k$  в процессе деформации цилиндрических образцов при различных давлениях в испытательной камере, МПа: 1 – 0; 2 – 300; 3 – 600; 4 – 900; 5 – 1150

В работах [16, 17] осуществлялось определение поверхности пластичности (5), аппроксимированной несколько иной, чем (6) зависимостью. Экспериментальные данные были получены при нагружениях типа  $\sigma/T \neq \text{const}$  и допущении, что в испытаниях на растяжение плоских образцов  $\mu_\sigma = \text{const}$ . Позднее, авторы работы [10] показали, что вид напряженного состояния в таких испытаниях существенно изменяется по мере развития деформации. Результаты наших вычислений  $\mu_\sigma$  при растяжении плоских образцов (см. рис. 3) подтверждают это.

Приведем некоторые соображения, позволяющие упростить формулу (6) для проведения параметрической идентификации. В частном случае, при  $\mu_\sigma = 0$  на всем процессе деформирования, формула (6) может быть записана в виде

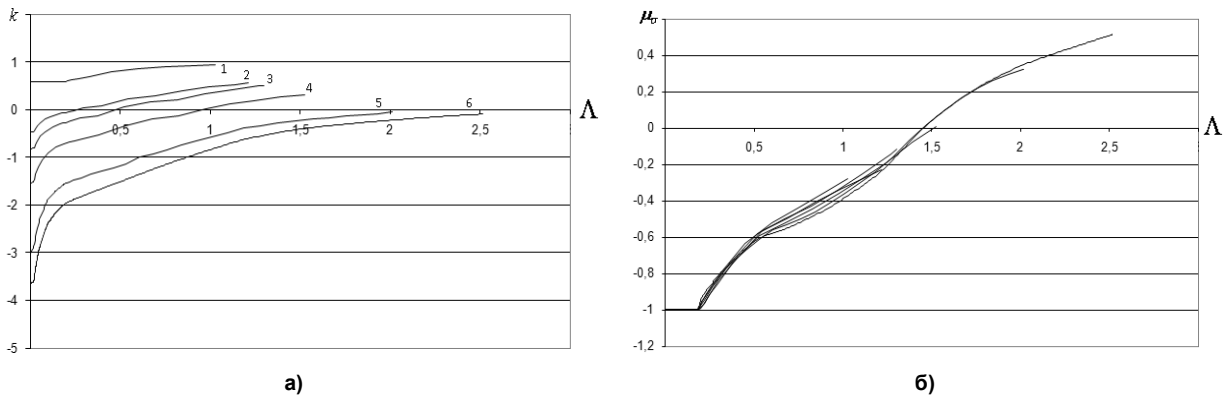


Рис. 3. Изменение показателя напряженного состояния  $k$  и коэффициента Лоде  $\mu_\sigma$  в процессе деформации плоских образцов при различных давлениях в испытательной камере, МПа: 1 – 0; 2 – 208; 3 – 416; 5 – 694; 6 – 833

$$\Lambda_P = a_0 = \Lambda_{P_0}, \quad (7)$$

где  $\Lambda_{P_0}$  – пластичность материала в условиях постоянного на всем процессе деформирования  $\mu_\sigma = 0$ .

При неизменном  $\mu_\sigma = -1$  формула (6) может быть записана в виде

$$\Lambda_P = a_0 - a_1 + a_2 = \Lambda_{P_0} - a_1 + a_2 = \Lambda_{P_{-1}}, \quad (8)$$

где  $\Lambda_{P_{-1}}$  – пластичность материала в условиях постоянного на всем процессе деформирования  $\mu_\sigma = -1$ .

По аналогии с (7) и (8) при неизменном  $\mu_\sigma = +1$  можно записать:

$$\Lambda_P = a_0 + a_1 + a_2 = \Lambda_{P_0} + a_1 + a_2 = \Lambda_{P_{+1}}, \quad (9)$$

где  $\Lambda_{P_{+1}}$  – пластичность материала в условиях постоянного на всем процессе деформирования  $\mu_\sigma = +1$ .

С другой стороны, величины  $\Lambda_{P_0}, \Lambda_{P_{-1}}, \Lambda_{P_{+1}}$  могут быть аппроксимированы зависимостями:

$$\Lambda_{P_0} = b_1 \exp(b_2 k); \quad (10)$$

$$\Lambda_{P_{-1}} = b_3 \exp(b_4 k); \quad (11)$$

$$\Lambda_{P_{+1}} = b_5 \exp(b_6 k), \quad (12)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  – неизвестные коэффициенты.

Подставив величины  $\Lambda_{P_0}, \Lambda_{P_{-1}}, \Lambda_{P_{+1}}$  из (10)–(12) в формулы (7)–(9) можно выразить  $a_0, a_1$  и  $a_2$  через  $b_1 \dots b_6$ :

$$a_0 = b_1 \exp(b_2 k);$$

$$a_1 = 0,5b_5 \exp(b_6 k) - 0,5b_3 \exp(b_4 k); \quad (13)$$

$$a_2 = 0,5b_3 \exp(b_4 k) - b_1 \exp(b_2 k) + 0,5b_5 \exp(b_6 k).$$

Подставив выражения (13) в формулу (6), получим:

$$\begin{aligned} \Lambda_P = & b_1 \exp(b_2 k) + (0,5b_5 \exp(b_6 k) - \\ & - 0,5b_3 \exp(b_4 k))\mu_\sigma + (0,5b_3 \exp(b_4 k) - \\ & - b_1 \exp(b_2 k) + 0,5b_5 \exp(b_6 k))\mu_\sigma^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, получена зависимость с шестью неизвестными коэффициентами  $b_1 \dots b_6$ . Для определения этих коэффициентов были выполнены эксперименты на кручение цилиндрических образцов, растяжение цилиндрических и плоских образцов в испытательной камере с жидкостью при различных давлениях.

#### 1. Кручение цилиндрических образцов

Коэффициент  $b_1$  может быть определен в результате эксперимента на кручение цилиндрического образца. При этом  $k = 0$ ,  $\mu_\sigma = 0$  и постоянны в течение всего процесса деформирования. Тогда формула (14) будет иметь вид

$$\Lambda_{P_0} = b_1. \quad (15)$$

Здесь  $\Lambda_{P_0}$  равна степени деформации сдвига при кручении в момент разрушения образца, которая может быть определена по формуле из [2]:

$$\Lambda_{P_0} = \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (16)$$

где  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  – углы наклона риски, нанесенной на поверхности образца, параллельно к образующей, до испытания и после него. В результате было получено значение  $b_1 = 1,98$ .

#### 2. Растяжение цилиндрических образцов

в камере с жидкостью при различных давлениях

Коэффициенты  $b_3$  и  $b_4$  могут быть определены по результатам экспериментов на растяжение цилиндрических образцов в испытательной камере с жидкостью, находящейся под регулируемым давлением. В этих экспериментах величина  $\mu_\sigma = -1$  и неизменна на всем процессе деформирования, а величина  $k$  изменяется в процессе испытания, при этом зависит от давления жидкости в испытательной камере. В работе выполнены эксперименты по растяжению цилиндрических образцов в камере с давлением жидкости 300, 600, 900, 1150 МПа.

Изменение величины  $k$  в процессе испытания образцов под разными давлениями среды вычисляется по формуле (2), где  $\sigma_s$  – сопротивление

деформации исследуемой стали, МПа;  $p$  – давление жидкости в испытательной камере, МПа.

Величина  $d/R = 0$  на стадии равномерной деформации, а после образования шейки зависит от степени деформации сдвига и не зависит от давления жидкости в испытательной камере. По результатам экспериментов на растяжение для стадии локализации деформации зависимость величины  $d/R$  от  $\Lambda$  была описана формулой из [2]:

$$d/R = (\Lambda - 0,2)^{0,7}, \quad (17)$$

где  $d$  – диаметр шейки в момент разрушения;  $R$  – радиус контура в продольном сечении образца в момент разрушения. В данной работе эти величины определялись после испытаний при различных давлениях среды, путем измерения контура образца после разрушения с помощью бесконтактной оптической системы Strain Master. Степень деформации сдвига определялась по формуле

$$\Lambda = 2\sqrt{3} \cdot \ln(d_0/d), \quad (18)$$

где  $d_0$  – начальный диаметр рабочей части образца. Следует отметить, что полученная после измерений контура разрушившегося образца зависимость  $d/R$  от  $\Lambda$ , практически совпала с формулой (17), предложенной в работе [2].

С учетом зависимости (4) по формуле (2) были рассчитаны значения  $k$  при различных степенях деформации сдвига.

Так как величина  $\omega$  в момент разрушения образца равна 1, то, воспользовавшись линейной моделью поврежденности [1], для каждого испытания можно записать:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_{p-1}} = 1, \quad (19)$$

где  $n$  – количество этапов монотонного нагружения;  $\Delta\Lambda_i$  – степень деформации сдвига, накопленная на участке с постоянным  $k_i$ . Подсчитывая суммарную величину поврежденности, путем варьирования коэффициентов  $b_3$  и  $b_4$ , минимизировали квадрат отклонения накопленной поврежденности от единицы для каждого образца. Таким образом, были найдены значения  $b_3 = 5$  и  $b_4 = -0,73$ . При этом максимальное отклонение рассчитанной поврежденности от 1 не превысило 10%.

### 3. Растяжение плоских образцов в камере с жидкостью при различных давлениях

Коэффициенты  $b_2$ ,  $b_5$  и  $b_6$  определялись с использованием результатов экспериментов на растяжение плоских образцов в испытательной камере с жидкостью, находящейся под регулируемым давлением. В работе выполнены эксперименты по растяжению плоских образцов в камере с давлением жидкости 208; 277; 416; 694; 833 МПа. В этих экспериментах величины  $\mu_\sigma$  и  $k$  не являются постоянными в процессе испытания, поэтому для расчета пластичности  $\Lambda_p$  должна использоваться формула (14).

Аналитических решений по точному определению  $k$  и  $\mu_\sigma$  в процессе растяжения плоских образцов в литературе обнаружено не было, и данные величины в работе определялись по результатам математического моделирования методом конечных элементов. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Для определения оставшихся неизвестных коэффициентов  $b_2$ ,  $b_5$  и  $b_6$  вновь воспользуемся условием (19). В этом случае формула (14) будет определена с точностью до неизвестных коэффициентов  $b_2$ ,  $b_5$  и  $b_6$  для каждого этапа, на котором накоплена деформация сдвига  $\Delta\Lambda_i$  при постоянных  $k_i$  и  $\mu_\sigma$ . При значениях  $b_2 = -0,79$ ;  $b_5 = 5,4$  и  $b_6 = -1,2$  максимальное отклонение рассчитанной поврежденности от 1 не превысило 7,5%.

После определения коэффициентов  $b_1 \dots b_6$  формула (14) для стали 20 записывается в виде

$$\Lambda_p = 1,98 \exp(-0,8k) + (2,7 \exp(-1,2k) - 2,5 \exp(-0,7k))\mu_\sigma + (2,5 \exp(-0,7k) - 1,98 \exp(-0,8k) + 2,7 \exp(-1,2k))\mu_\sigma^2. \quad (20)$$

Формула (20) определена для значений показателя напряженного состояния из интервала  $-2,5 < k < 1$  и коэффициента Лодэ из интервала  $-1 < \mu_\sigma < 0,51$ , поскольку за пределами этих интервалов не имеется достаточного количества экспериментальных данных по предельной степени деформации сдвига.

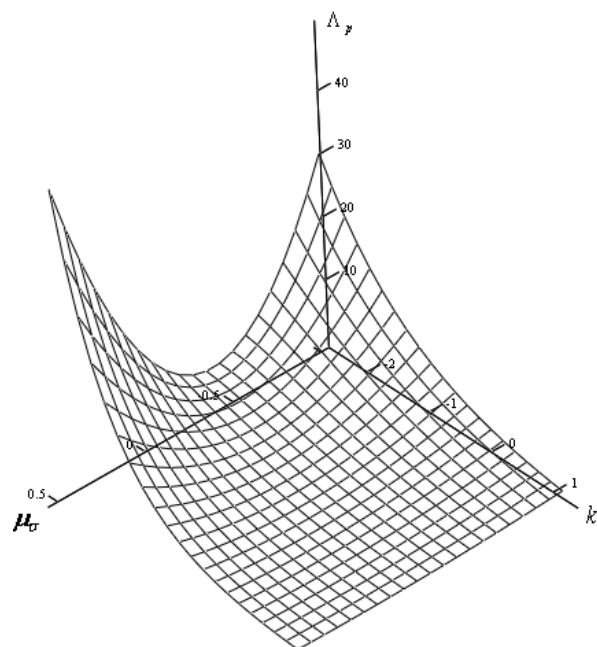


Рис. 4. Диаграмма пластичности стали 20

На рис. 4 изображена поверхность, которая описывается формулой (20). Из рисунка хорошо заметно, что взаимное влияние показателей напряженного состояния на пластичность материала

носит сложный характер. Например, влияние показателя Лоде особенно сильно проявляется в области сжимающих напряжений ( $k < 0$ ), при которых, как правило, протекают процессы ОМД.

#### Выводы

Обработка полученных экспериментальных данных, с применением конечно-элементного моделирования и процедуры параметрической идентификации, позволила разработать новую методику построения диаграммы пластичности с разделением влияния показателей  $k$  и  $\mu_\sigma$  при монотонном нагружении. Такая диаграмма пластичности позволяет оценивать пластические свойства материала при определенных напряженных состояниях и рассчитывать его поврежденность, если известна история нагружения.

Полученная сложная зависимость предельной деформации сдвига от показателей  $k$  и  $\mu_\sigma$ , изображенная на рис. 4, указывает на необходимость детального и глубокого изучения микромеханизмов влияния напряженного состояния на пластические свойства материала.

#### Литература

1. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
2. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирецкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
3. Губкин, С.И. Деформируемость металлов / С.И. Губкин. – М.: Металлуриздат, 1953. – 444 с.
4. Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия. – 1970. – 230 с.
5. Скуднов, В.А. О критерии пластичности для обработки металлов давлением / В.А. Скуднов, Л.Д. Соколов // Известия АН СССР. Металлы. – 1965. – № 4. – С. 117–125.
6. Зайков, М.А. К вопросу о критерии пластичности металла / М.А. Зайков, В.Н. Перетягко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 10. – С. 90–93.
7. Пресняков, А.А. Пластичность металлических сплавов / А.А. Пресняков. – Алма-Ата: изд-во АН КазССР, 1959. – 211 с.
8. Мигачев, Б.А. Оценка зависимости пластичности металлов от напряженного состояния методом оптимальной экстраполяции / Б.А. Мигачев, В.Г. Бурдуковский, Ф.М. Журавлев // Известия АН СССР. Металлы. – 1986. – № 4. – С. 84–88.
9. Воронцов, В.К. Методика экспериментального определения диаграмм пластичности / В.К. Воронцов, С.А. Машеков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 5. – С. 44–48.
10. Богатов, А.А. Влияние формы поперечного сечения образца на вид девиатора напряжений при растяжении / А.А. Богатов, А.В. Выдрин, В.Л. Колмогоров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 12. – С. 50–52.
11. Установка для испытания материалов под гидростатическим давлением / В.Ф. Шиминцев, А.А. Родайкин, А.А. Богатов и др. // Заводская лаборатория. – 1978. – № 10. – С. 1279–1280
12. А.с. 1422090 СССР, МПК G 01 N 3/10. Устройство для испытания образцов при трехосном нагружении / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.Н. Быков, А.В. Нестеренко (СССР). – № 420976767/25–28; заявл. 16.03.87; опубл. 7.09.88, Бюл. №33. – 2 с.: ил.
13. Богатов, А.А. Методики определения технологических свойств металла и его отдельных структурных составляющих в условиях сложного нагружения / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.П. Швейкин, А.В. Нестеренко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 42–49.
14. Smirnov, S.V. In: *Advanced Methods in Materials Processing Defects*, by M. Predeleanu and P. Gilormini / S.V. Smirnov, T.V. Domilovskaya, A.A. Bogatov // *Elsivier Science B.V.* – 1997. – P. 71–80.
15. Коновалов, А.В. Построение математической модели разрушения при пластической деформации методами теории идентификации / А.В. Коновалов // *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* – Свердловск: УПИ, 1985. – Вып. 12. – С. 4–29.
16. Важнецов, Ю.Г. Оценка влияния истории нагружения на пластичность металлов / Ю.Г. Важнецов, В.В. Исаев // *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* – Свердловск: УПИ, 1982. – Вып. 9. – С. 24–29.
17. Важнецов, Ю.Г., Исаев В.В. Методика построения диаграмм пластичности металлов с учетом вида девиатора / Ю.Г. Важнецов, В.В. Исаев // *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* – Свердловск: УПИ, 1982. – Вып. 9. – С. 24–29.

Поступила в редакцию 24 июня 2011 г.