

В. Ф. Даненко¹, Л. М. Гуревич¹, В. Ю. Цюцюра², Р. Р. Магамаев¹

**О ПОСТРОЕНИИ ДИАГРАММЫ ПЛАСТИЧНОСТИ
УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² АО «Волжский трубный завод»

e-mail: omd@vstu.ru

Проведено испытание на одноосное растяжение цилиндрических образцов (гладких и с выточкой), изготовленных из сорбитизированной с прокатного нагрева и патентированной в свинцовых ваннах катанки из углеродистой стали 70. Результаты испытаний позволили получить дополнительные данные для построения диаграмм пластичности стали. Полученные диаграммы пластичности могут служить ориентиром технологиям при выборе стали, ее микроструктуры, прогнозировать способность к холодной деформации при обработке давлением.

Ключевые слова: сорбитизированная катанка, патентирование, микроструктура, диаграмма пластичности, напряженное состояние, деформация сдвига, разрушение.

V. F. Danenko, L. M. Gurevich, V. Yu. Tsyutsyura, R. R. Magamaev

ON CONSTRUCTION OF THE PLASTICITY DIAGRAM OF CARBON STEEL OF DIFFERENT STRUCTURE

¹ Volgograd State Technical University

² Volga pipe plant

A test for uniaxial stretching of cylindrical samples (smooth and with a recess) made of carbon steel wire rod 70, sorbitized from rolling heating and patented in lead baths, was carried out. The test results allowed us to obtain additional data for constructing diagrams of the plasticity of steel. The obtained plasticity diagrams can serve as a guide for technologists when choosing steel, its microstructure, and predict the ability to cold deformation during pressure treatment.

Keywords: sorbitized wire rod, patenting, microstructure, plasticity diagram, stress state, shear deformation, fracture.

Для оценки деформируемости металла и прогнозирования его разрушения при обработке давлением широкое применение получила феноменологическая теория разрушения [1, 2], основанная на физических представлениях о закономерностях разрушения металла при пластической деформации. Экспериментально показано, что накопление поврежденности металла при пластической деформации происходит пропорционально степени деформации, а интенсивность накопления повреждений зависит от физической природы металла, условий и характера деформации. При холодной деформации значительное влияние на интенсивность пластического разрыхления оказывает *схема напряженного состояния*.

В работе [1] было высказано предположение, что пластичность металлов должна быть поставлена в зависимость от двух независимых показателей напряженного состояния:

относительного среднего нормального напряжения (σ/T) – отношения гидростатического напряжения и интенсивности касательных напряжений:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\sqrt{6} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3 \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (1)$$

показателя Лоде (μ_σ), характеризующего вид девиатора напряжений:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные нормальные напряжения.

Принятой мерой пластичности является деформация сдвига A_p , накопленная металлом к моменту разрушения, записываемая в виде функции:

$$A_p = A_p(\sigma/T, \mu_\sigma). \quad (3)$$

Полученная зависимость пластичности металла от показателей напряженного состояния была названа диаграммой пластичности. В. Л. Колмогоров предложил использовать несколько видов испытаний металлов для по-

строения диаграммы пластичности [3]. Им была разработана методика расчета показателя напряженного состояния и степени деформации сдвига в момент образования макроскопической трещины при испытании на растяжение, скручивание, изгиб и осадку. В дальнейшем была разработана методика определения пространственных (трехмерных) диаграмм пластичности, в которой независимое варьирование показателей σ/T и μ_σ достигалось проведением разнотипных испытаний под гидростатическим давлением [4].

Анализ диаграмм пластичности [3] говорит о том, что существуют критические значения показателей напряженного состояния для каждого сплава: при одних показателях σ/T и μ_σ $A_p \rightarrow 0$, и происходит переход из пластического состояния в хрупкое, а при других показателях $A_p \rightarrow \infty$ – металл переходит в состояние неограниченной пластичности. Различное структурное состояние углеродистой стали, полученное по разным режимам термической обработки, дает возможность оценить влияние микроструктуры на пластические свойства стали при волочении (при анализе диаграммы пластичности). Из результатов исследования напряженно-деформированного состояния процессов ОМД следует [1], что характерным для процесса волочения проволоки является изменение показателя σ/T в пределах от $-1,15$ до $0,58$, при постоянстве $\mu_\sigma = -1$.

Цель работы – определение вида зависимости предельной пластичности высокоуглеродистой стали с различной структурой от напряженного состояния при холодной деформации.

Материалы, образцы и методика исследований

Испытанию на растяжение подвергались гладкие цилиндрические образцы $\varnothing 6$ мм, а также образцы $\varnothing 8$ мм, в которых сложное напряженное состояние создавалось за счет кольцевых концентраторов с радиусами кривизны $R = 2,50; 2,70; 3,90$ и $5,0$ мм (рис. 1).

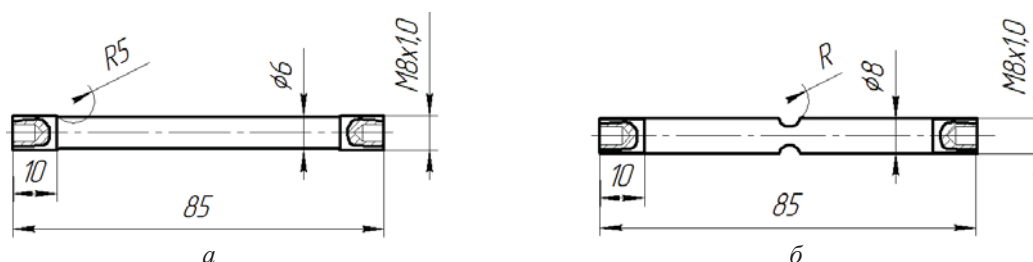


Рис. 1. Образцы для испытаний:
а – гладкий; б – с выточкой

Заготовкой для изготовления образцов служила поставляемая Череповецким металлургическим комбинатом катанка из стали 70, предназначенная для изготовления канатной и пружинной проволоки.

В зависимости от структуры испытывались образцы двух типов:

- 1) ускоренно охлажденные с прокатного нагрева (сорбитизированные);
- 2) термообработанные (патентированные) по режиму: предварительный нагрев до 950 °С, выдержка в расплаве свинца при 450 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Применение сорбитизированной с прокатного нагрева катанки для производства метизов рассматривалось в работах [5–7]. Сорбитизирование с прокатного нагрева позволяет повысить производительность по сравнению с патентированием. Оборудование для ускоренного ох-

лаждения (сорбитизации) устанавливают в линию непрерывного проволочного стана за последней чистовой клетью. На выходе из этой клетки катанка подвергается водяному охлаждению до температуры поверхностных слоев несколько ниже точки мартенситного превращения, что вызывает формирование мартенситной структуры в тонком слое. После прекращения подачи воды происходит своеобразный «самоотпуск» витков катанки за счет сохранившегося тепла в ее более глубоких слоях. Это приводит к формированию в поверхностном слое сорбита отпуска с высокой деформационной способностью. Микроструктуру стали (процентное содержание сорбита и величину межпластинчатого расстояния) оценивали по ГОСТ 5639–82. Содержание сорбита отпуска для образцов 1-го типа составляло ~40 %, а для 2-го типа ~80 % (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Структура заготовки из стали 70 с 40 % сорбита (а) и 80 % сорбита (б) (×500)

Испытания образцов на растяжение с последующим разрушением проводились на разрывной машине УМЭ-10Т с гидравлическим приводом. Крепление образца с выточкой в захватах испытательной машины показано на рис. 3.

При растяжении образцов с выточкой область пластической деформации начинается

в вершине выточки, а затем распространяется к середине сечения образца. В дальнейшем при растяжении как гладких, так и надрезанных образцов деформация в определенный момент локализуется и протекает с образованием естественной шейки. В месте разрыва образца деформация развивается монотонно. При этом степень деформации сдвига одинакова во всех

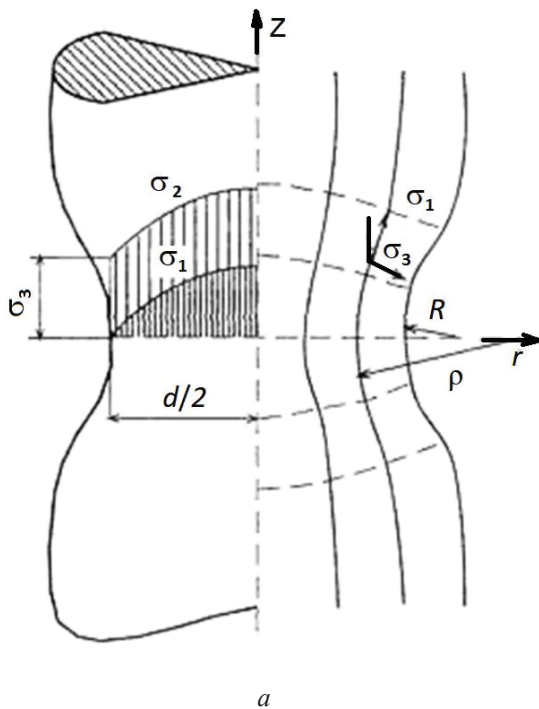
точках поперечного сечения [1] и определяется по формуле $\Lambda = 2\sqrt{3} \ln(d_0/d)$, где d_0 и d – начальный и текущий диаметры образца.



Рис. 3. Образец с выточкой в захватах испытательной машины УМЭ-10Т

Степень деформации сдвига Λ_p , соответствующая моменту разрушения, определяется при подстановке в формулу значения диаметра образца при разрушении $d = d_p$.

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3} \ln(d_0/d_p) \quad (4)$$



а



б

Рис. 4. Напряженное состояние (а) и разрушение металла в шейке (б) цилиндрического образца при растяжении

Для определения напряженного состояния в шейке образца (рис. 4) Н. Н. Давиденковым и Н. И. Спиридоновой [8] предлагаются уравнения

$$\sigma_r = \sigma_\phi = \sigma_s (d^2 - 4r^2)/4d \cdot R - p;$$

$$\sigma_z = \sigma_s [1 + (d^2 - 4r^2)/4d \cdot R] - p,$$

где r – расстояние от оси образца; p – гидростатическое давление в испытательной камере.

Из рисунка видно, что при отсутствии гидростатического давления p в сечении шейки на наружной поверхности образца ($r = d/2$) напряжения $\sigma_r = \sigma_\phi = 0$, а $\sigma_z = \sigma_s$. В центре шейки при $r = 0$ напряжения $\sigma_r = \sigma_\phi = \sigma_s \cdot d/4R$; $\sigma_z = \sigma_s (1 + d/4R)$.

Напряженное состояние на оси образца в сечении шейки соответствует схеме трехосного растяжения, которая, при отсутствии гидростатического давления p , характеризуется двумя независимыми показателями [1]:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{d}{R}\right) \text{ и } \mu_\sigma = -1, \quad (5)$$

где d – диаметр образца; R – радиус кривизны в шейке.

Показатель Лоде μ_σ не зависит ни от формы шейки образца, ни от давления p и остается неизменным в процессе испытания.

Зависимость $\Lambda_p = \Lambda_p(\sigma/T)$ при $\mu_\sigma = \text{const}$ всегда убывающая. Она показывает, что рост сжимающих напряжений всегда повышает пластичность металла при прочих равных условиях. Согласно [2], зависимость $\Lambda_p = \Lambda_p(\sigma/T)$ при $\mu_\sigma = \text{const}$ хорошо аппроксимируется экспонентой. Известный вид математической модели может существенно сократить число опытов при экспериментальном определении диаграмм пластичности.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний на растяжение цилиндрических образцов при атмосферном давлении приведены в таблице ниже. Полученные значения размеров образцов позволили определить по уравнениям (4) и (5) предельную степень деформации сдвига Λ_p и показатель напряженного состояния σ/T .

Показатели напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов при растяжении

Радиус кривизны профиля образца, мм	Диаметр образца, мм		Показатель напряженного состояния, $K=\sigma/T$	Степень деформации сдвига, Λ_p
	начальный, d_0	конечный, $d_{\text{ш}}$		
40 % сорбит				
Гладкий $R=\infty$	5,850	4,650	0,58	0,8
$R=2,50$	6,465	5,810	1,58	0,37
$R=5,00$	5,795	5,092	1,018	0,447
80 % сорбит				
Гладкий $R=\infty$	4,840	4,000	0,58	0,668
$R=2,70$	5,958	5,522	1,463	0,263
$R=3,90$	6,137	5,523	1,19	0,365

Обобщение экспериментально определенных значений показателей Λ_p , σ/T и данных работы [5] позволило графически изобразить за-

висимость предельной пластичности стали 70 с различной структурой от показателя напряженного состояния (рис. 5).

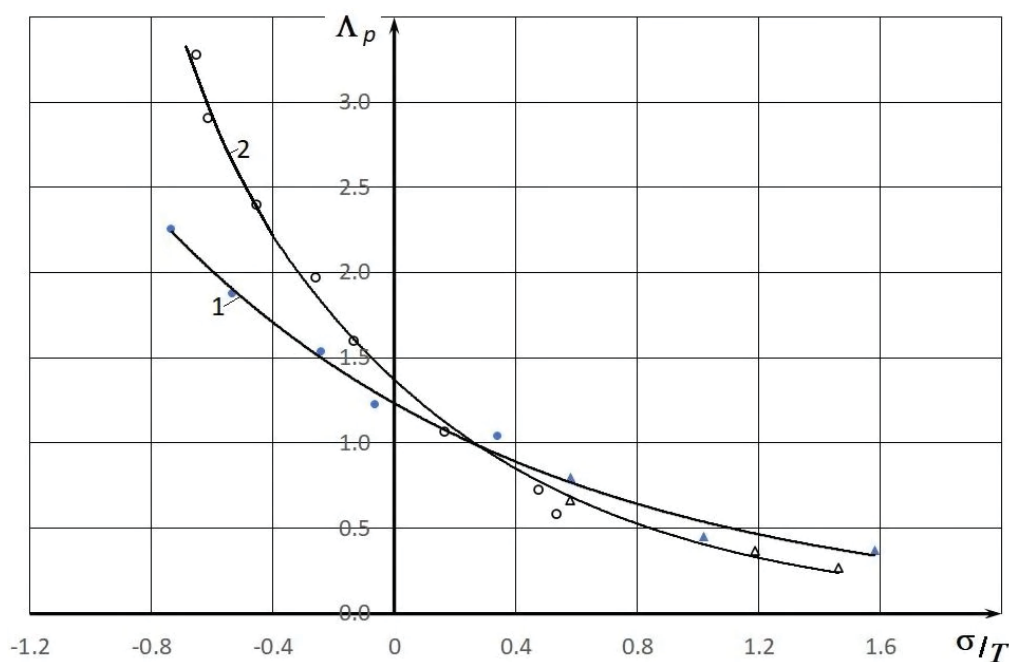


Рис. 5. Диаграммы пластичности стали 70:

1 – ~40 % сорбита; 2 – ~80 % сорбита:

○● – данные работы [5]; Δ ▲ – данные авторов

Вид кривых, показанных на рис. 5, подтверждает мнение [2] об экспоненциальном характере зависимости $\Lambda_p = \Lambda_p(\sigma/T)$ при $\mu_\sigma = \text{const}$.

$$\Lambda_p = A \cdot e^{-B \cdot \frac{\sigma}{T}}. \quad (6)$$

Определение постоянных A и B проводили путем линеаризации формулы (6) ($\ln \Lambda_p = -B \cdot \frac{\sigma}{T} + \ln A$) и применения метода наименьших квадратов.

Обработка данных рис. 5 показала, что зависимость $\Lambda_p = \Lambda_p(\sigma/T)$ для стали 70, ускоренно охлажденной с прокатного нагрева (содержание сорбита ~40 %), может быть записана в виде

$$\Lambda_p = 1,234 \cdot e^{-0,815 \frac{\sigma}{T}}, \quad (7)$$

а для стали 70 после патентирования (содержание сорбита ~80 %):

$$\Lambda_p = 1,345 \cdot e^{-1,139 \frac{\sigma}{T}}. \quad (8)$$

Оценка силы (тесноты) линейной связи между переменными σ/T и $\ln \Lambda_p$ с помощью выборочного коэффициента корреляции r_b показала, что для образцов первого типа $r_b = -0,99$, а для образцов второго типа $r_b = -0,95$. Для уровня значимости $\alpha = 5\%$ и числа степеней свободы $k = n-2 = 8-2 = 6$ для образцов первого типа значение квантили $r_{(0,95; 6)} = 0,707$; для образцов второго типа ($k = n-2 = 11-2 = 9$) значение $r_{(0,95; 9)} = 0,602$. Выполнение условия $|r_b| > r$ говорит о значимости в обоих случаях выборочного коэффициента корреляции. Отрицательное значение r_b указывает, что с уменьшением показателя напряженного состояния предельная пластичность образцов первого и второго типа увеличивается.

Из рис. 5 следует, что пластичность растёт за счет сжимающих компонент главных напряжений и уменьшается с увеличением растягивающих напряжений. При значениях $\sigma/T > 0,3$ значения предельной пластичности Λ_p стали с ~40 % сорбита отпуска выше, чем стали с ~80 % сорбита отпуска. Это подтверждается экспериментальными данными при определении показателя сужения ψ образцов обоих типов при разрыве: при $\sigma/T = 0,58$ степень деформации сужения для образца первого типа на 16 % выше, чем для образца второго типа. Известно, что с увеличением процентного содержания сорбита при патентировании стали и увеличением степени дисперсности структуры изменяются и механические свойства стали (возрастают твердость и прочность и одновременно уменьшаются пластичность и вязкость).

Для стали с содержанием сорбита отпуска 80 % интенсивность изменения пластичности (кривая 2) выше, чем для стали с 40 % сорбита отпуска (кривая 1). При значениях $\sigma/T < 0,3$ предельная степень деформации сдвига патентированной стали выше, чем сорбитизированной с прокатного нагрева. Таким образом, микроструктура стали играет важную роль в сохранении ресурса пластичности при холодной деформации.

Выводы

Проведено испытание на одноосное растяжение при атмосферном давлении цилиндрических образцов (гладких и с надрезанной выточкой), изготовленных из сорбитизированной с прокатного нагрева (40 % сорбита отпуска) и патентированной в свинцовых ваннах (80 % сорбита отпуска) катанки из углеродистой стали 70. Результаты испытаний позволили дополнить число исходных данных, полученных с помощью феноменологической теории разрушения, для построения диаграмм пластичности стали.

Показано, что зависимость предельной пластичности стали Λ_p от показателя напряженного состояния $K = \sigma/T$ при коэффициенте Лоде $\mu_\sigma = \text{const}$ хорошо аппроксимируется экспонентой, что подтверждается полученными значениями выборочного коэффициента корреляции. Установление вида зависимости $\Lambda_p = \Lambda_p(\sigma/T)$ позволит сократить число опытов при экспериментальном определении диаграммы пластичности.

Полученная диаграмма пластичности может служить ориентиром технологам при выборе стали, параметров термической обработки и получаемой микроструктуры, прогнозировать способность к холодной деформации при обработке давлением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богатов, А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.
2. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением : Учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Напряжения, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров [и др.]. – М. : Металлургия, 1970. – 230 с.
4. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
5. Некоторые подходы к выбору материала и технологии изготовления проволоки под холодную высадку /

Ал-р А. Соколов, В. И. Артюхин, Г. С. Гун, Ал-й А. Соколов // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация, 2004. – С. 450–452.

6. *Соколов, А. А.* Обеспечение качества дюбелей совершенствованием технологических переделов производства проволоки : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Соколов. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2005. – 22 с.

7. Оценка эффективности применения сорбитизиро-

ванной катанки для производства метизов / В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (257) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 68–74.

8. *Давиденков, Н. Н.* Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова // Заводская лаборатория. – 1945. – Т. XI. – № 6. – С. 583–593.