



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>
УДК 621.771.42:621.78

Поступила 24.06.2019
Received 24.06.2019

ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Российская Федерация, E-mail: olga1560@yandex.ru

Предложены показатель степени относительного уменьшения площади поперечного сечения и показатель степени развития шейки, более чувствительных к изменению структурных параметров и температуры деформации углеродистой стали по сравнению с традиционными: относительным сужением и показателем истинной деформации. Рассмотрена роль релаксации внутренних напряжений и повышения подвижности дислокаций при формировании пластических свойств углеродистой стали.

Ключевые слова. Относительное изменение при растяжении площади поперечного сечения, структурные параметры, температура деформации, подвижность дислокаций и релаксация внутренних напряжений.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Оценка пластичности при деформации углеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 85–88. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>.

EVALUATION OF PLASTICITY DURING DEFORMATION OF CARBON STEEL

V. P. FETISOV, Orel city, Russia, E-mail: olga1560@yandex.ru

The indicator of the degree of relative reduction of the cross-sectional area and the indicator of the degree of development of the necking, more sensitive to changes in the structural parameters and the deformation temperature of carbon steel compared to the traditional were proposed in comparison with the relative contraction and the true deformation index. The role of relaxation of internal stresses and increased mobility of dislocations in the formation of plastic properties of carbon steel is considered.

Keywords. Relative change in the tensile cross-sectional area, structural parameters, deformation temperature, dislocation mobility and relaxation of internal stresses.

For citation. Fetisov V. P. Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2019, no. 3, pp. 85–88. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>.

Согласно принятым в теории пластической деформации представлениям, пластичность металла есть функция его состояния, зависящего от внешних (температуры, скорости и схемы деформации) и внутренних (химического состава, структуры, типа кристаллической решетки) факторов. Поэтому поиск показателей пластичности, наиболее полно отражающих состояние металла, является важным этапом разработки перспективных технологических процессов пластической деформации.

В настоящей статье проведен анализ показателей пластичности углеродистой стали на базе изменения при растяжении площади поперечного сечения: традиционных – относительное сужение $\Psi = (F_0 - F_K)/F_0$ и показатель истинной деформации $\varepsilon_\Psi = \ln(F_0 / F_K)$, а также предлагаемого – показатель степени относительного уменьшения площади поперечного сечения $Y_\Psi = (F_0 - F_K)/F_K$. Переменными параметрами были величина зерна феррита, межпластиночное расстояние в перлите, температура и схема деформации. Результаты исследований приведены в табл. 1–5. Выбор температуры при деформации растяжением осуществляли исходя из исключения влияния развития процессов динамического деформационного старения (ДДС) на свойства углеродистой стали.

Для растяжения при комнатной температуре увеличение размера структурных параметров сопровождается снижением исследованных показателей пластичности, причем в большей степени с повышением количества перлита при переходе от стали 15кп к стали 35 и 80 (табл. 1–3). Так, отношение относительного сужения для экстремальных размеров структурных параметров соответственно составляет 1,06; 1,15 и 3,67. Сравнение относительного сужения для сопоставимых размеров зерна феррита в ста-

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита (d) на изменение показателей пластичности при деформации стали 15кп со скоростью 10^{-3} с^{-1} и при температурах 20 и 400 °С

$d, \text{ мм}$	0,016			0,022			0,042			0,069			0,11			0,016/0,11	
	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С
$\Psi, \%$	69	75	1,09	69	71	1,03	68	71	1,06	65	71	1,09	65	70	1,08	1,06	1,07
ε_{Ψ}	1,17	1,39	1,19	1,17	1,24	1,06	1,14	1,24	1,11	1,05	1,24	1,18	1,05	1,20	1,14	1,11	1,16
Y_{Ψ}	2,23	3,0	1,34	2,23	2,45	1,10	2,12	2,45	1,21	1,86	2,45	1,32	1,86	2,33	1,25	1,20	1,29

Таблица 2. Влияние размера зерна феррита (d) на изменение показателей пластичности при деформации стали 35 со скоростью 10^{-3} с^{-1} и при температурах 20 и 400 °С

$d, \text{ мм}$	0,012			0,018			0,025			0,012/0,025	
	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С
$\Psi, \%$	61	83	1,36	59	83	1,41	53	83	1,57	1,15	1,00
ε_{Ψ}	0,94	1,77	1,88	0,89	1,77	1,99	0,76	1,77	2,33	1,24	1,00
Y_{Ψ}	1,56	4,88	3,13	1,44	4,88	3,39	1,13	4,88	4,32	1,38	1,00

Таблица 3. Влияние межпластиночного расстояния в перлите (Δ) на изменение показателей пластичности при деформации стали 80 со скоростью 10^{-3} с^{-1} и при температурах 20 и 400 °С

$\Delta, \text{ мм}$	0,000088			0,000142			0,000296			0,000540			0,000088/0,000540	
	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С	$\frac{400^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C}}$	20 °С	400 °С
$\Psi, \%$	55	78	1,42	48	72	1,5	31	64	2,06	15	52	3,47	3,67	1,5
ε_{Ψ}	0,80	1,51	1,89	0,65	1,27	1,95	0,37	1,02	2,76	0,16	0,73	4,56	5,0	2,07
Y_{Ψ}	1,22	3,54	2,90	0,92	2,57	2,79	0,45	1,78	3,95	0,18	1,08	6,0	6,78	3,28

лях 15кп (0,016 мм) и 35 (0,018 мм) показывает его уменьшение с 69 до 59% с ростом количества перлита в стали.

Повышение температуры деформации до 400 °С носит специфический характер. По абсолютной величине прирост относительного сужения более значительный с увеличением количества перлита: 23–37% для стали 80, 22–24% для стали 35 и 2–6% для стали 15кп, причем практически не зависит от размера зерна феррита в сталях 15кп и 35 и заметно усиливается с 23 до 37% при увеличении межпластиночного расстояния в перлите стали 80.

Сопоставление исследованных показателей пластичности показывает, что показатели ε_{Ψ} и Y_{Ψ} более чувствительны к изменению структурных параметров и температуры деформации по сравнению с относительным сужением, при этом наилучший результат приходится на показатель степени относительного уменьшения площади поперечного сечения Y_{Ψ} .

Анализ кривых растяжения выявляет также взаимосвязь между локальным относительным удлинением и местной пластической деформацией шейки, заканчивающейся разрушением. Поэтому показатель $Y_{\text{ш}} = (\delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}}) / \delta_{\text{равн}}$ ($\delta_{\text{полн}}$ – полное относительное удлинение; $\delta_{\text{равн}}$ – равномерное относительное удлинение), определяющий степень относительного увеличения локального удлинения, можно считать показателем степени развития шейки. Расчеты, выполненные для скорости 10^{-3} с^{-1} , показали, что показатель $Y_{\text{ш}}$ для стали 80 (табл. 4) имеет аналогичную с показателями пластичности при контроле уменьшения площади поперечного сечения зависимость от межпластиночного расстояния в перлите и температуры деформации (см. табл. 3) и превосходит по чувствительности традиционные Ψ и ε_{Ψ} , но уступает Y_{Ψ} . Так, отношение $Y_{\text{ш}}$ для экстремальных параметров структуры и температуры деформации 400 °С составляет 2,77 против 3,28 для показателя Y_{Ψ} .

Предварительная деформация волочением с суммарным обжатием 75% при различных тепловых режимах не нарушает отмеченной тенденции в изменении показателей пластичности канатной проволоки диаметром 2,2 мм из стали 65 (табл. 5). Варьирование тепловым режимом волочения осуществлялось за счет последовательного однократного волочения со скоростью 105 м/мин на стане 1/550 (режим I) и при многократном волочении на стане магазинного типа 6/550 со скоростями на чистовом блоке 230 м/мин (режим II-1), 320 м/мин (режим II-2), 450 м/мин (режим II-3). В первом случае проволока на каждом по-

Т а б л и ц а 4. Изменения показателя степени развития шейки $Y_{ш}$ и показателя скорости релаксации ν при температуре деформации 20 °С (числитель) и 400 °С (знаменатель) стали 80 с различным межпластиночным расстоянием в перлите (Δ)

Δ , мм	$Y_{ш}$	$Y_{ш}^{400\text{ °С}} - Y_{ш}^{20\text{ °С}}$	ν	$\nu_{400\text{ °С}} - \nu_{20\text{ °С}}$
0,000088	$\frac{0,56}{1,72}$	1,16	$\frac{0,009}{0,125}$	0,116
0,000142	$\frac{0,25}{1,13}$	0,88	$\frac{0,008}{0,112}$	0,104
0,000296	$\frac{0,12}{0,84}$	0,72	$\frac{0,004}{0,107}$	0,103
0,000540	$\frac{0,0}{0,62}$	0,62	$\frac{0,002}{0,089}$	0,087

Т а б л и ц а 5. Влияние теплового режима волочения и дополнительной деформации ЗПИР на свойства канатной проволоки диаметром 2,2 мм из стали 65

Режим волочения	Холоднодеформированное состояние				После ЗПИР с радиусом изгиба 24 мм			
	σ_B , Н/мм ²	Ψ , %	ϵ_{Ψ}	Y_{Ψ}	σ_B , Н/мм ²	Ψ , %	ϵ_{Ψ}	Y_{Ψ}
I	1564	55	0,78	1,22	1485	58	0,87	1,38
II-1	1637	54	0,77	1,17	1548	56	0,82	1,27
II-2	1715	52	0,74	1,09	1617	53	0,76	1,13
II-3	1784	45	0,60	0,82	1666	50	0,69	1,0
I/II-3	0,88	1,22	1,30	1,49	0,89	1,16	1,26	1,38

следующем переходе поступает в волоку с температурой окружающей среды, в то время как с ростом скорости волочения на стане 6/550 температура проволоки возрастает и отмечается развитие чередующихся процессов ДДС и статического деформационного старения (СДС). Суммарным эффектом уменьшения подвижности дислокации при развитии чередующихся процессов ДДС и СДС является рост σ_B с 1564 Н/мм² (режим I) до 1784 Н/мм² (режим II-3) и снижение относительного сужения с 55 до 45%, а также числа скручиваний с 40 до 26 и числа перегибов с 14 до 12 [1].

Определение показателей пластичности на базе изменения при растяжении площади поперечного сечения канатной проволоки показало, что переход от Ψ к Y_{Ψ} как для холоднодеформированного состояния, так и после дополнительной деформации проволоки знакопеременным изгибом с растяжением (ЗПИР) обеспечивает более достоверную оценку ее пластических свойств (табл. 5). Так как число скручиваний и перегибов не в полной мере отражают служебные свойства канатной проволоки, в частности ее усталостную долговечность [2], то показатель Y_{Ψ} может быть использован для дополнительного контроля качества холоднодеформированной стали.

В работе [3] увеличение пластичности металлов связывают с повышением подвижности дислокаций (сокращение времени задержки пластического течения) и скорости (снижение времени) релаксации внутренних напряжений. При этом контроль скорости релаксации осуществляется при определении показателя ν в выражении $\sigma = \sigma_0 \dot{\epsilon}^{\nu}$, в котором напряжение σ и скорость деформации $\dot{\epsilon}$ связаны прямолинейной зависимостью в двойных логарифмических координатах.

В табл. 4 для стали 80 представлены результаты расчетов показателя скорости релаксации для истинного напряжения $\sigma_{0,05}$ при изменении $\dot{\epsilon}$ от 10^{-4} до 10^{-3} с^{-1} , который возрастает при повышении дисперсности перлита и температуры деформации и предопределяет соответствующее увеличение показателей пластичности (см. табл. 3).

Роль релаксации напряжений существенно возрастает при волочении проволоки из высокоуглеродистой стали в области сверхбольших суммарных обжатий. Распад цементита при пластической деформации, потеря пластинчатого строения перлита и неоднородное распределение дислокаций создают области локального перенапряжения с последующим возникновением в холоднодеформированной стали многочисленных микротрещин. Поэтому требуются дополнительные технологические решения, обеспечивающие еще до образования и развития микротрещин постоянную релаксацию локальных пиковых напряжений.

Что касается повышения подвижности дислокаций, то необходимо прежде всего обеспечить условия деформации, снижающих степень их блокировки атомами углерода при развитии процессов деформационного старения и из-за распада цементита при пластической деформации.

В работах [1, 4] рассмотрены технологические приемы по обеспечению релаксации локальных пиковых напряжений и повышению подвижности дислокаций в холоднодеформированной стали, однако требуются дополнительные исследования в этом направлении.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить резервы в оценке пластичности углеродистой стали на базе изменения при растяжении площади поперечного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов В. П.** Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996. 120 с.
2. **Фетисов В. П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. М.: Мир, 2005. 200 с.
3. **Соколов Л. Д.** Механические свойства редких металлов / Л. Д. Соколов, В. А. Скуднов, В. М. Солёнов, А. Н. Гладких, Д. И. Шетулов, А. М. Шнейберг, Г. П. Гусякова, Н. П. Дмитриев. М.: Metallurgia, 1972. 288 с.
4. **Фетисов В. П.** Пластичность высокопрочной проволоки / В. П. Фетисов. М.: Интермет Инжиниринг, 2011. 128 с.

REFERENCES

1. **Fetisov V. P.** *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Deformational aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
2. **Fetisov V. P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
3. **Sokolov L. D., Skudnov V. A., Soljonov V. M., Gladkih A. N., Shetulov D. I., Shnejberg A. M., Gusljakova G. P., Dmitriev N. P.** *Mehanicheskie svojstva redkih metallov* [Mechanical properties of rare metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 288 p.
4. **Fetisov V. P.** *Plastichnost' vysokoprochnoj provoloki* [Ductility of high strength wire]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2011, 128 p.