



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-51-54>
УДК 669

Поступила 10.11.2022
Received 10.11.2022

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

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

При контроле длины площадки текучести рассмотрено влияние размера зерна феррита, количества перлита, температуры, скорости и схемы деформирования на локализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали, снижающую способность металла к деформационному упрочнению.

Ключевые слова. Длина площадки текучести, деформация в приграничных областях зерен, внутризеренная деформация, локализация пластической деформации, способность к деформационному упрочнению.

Для цитирования. Фетисов В. П. Локализация пластической деформации при деформировании низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 51-54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-51-54>.

LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION DURING DEFORMATION OF LOW-CARBON STEEL

V. P. FETISOV, Orel city, the Russian Federation. E-mail: olga1560@yandex.ru

When controlling the length of the yield site, the influence of the ferrite grain size, the amount of perlite, temperature, speed and deformation scheme on the localization of low-carbon steel plastic deformation, which reduces the ability of the metal to deformation hardening, is considered.

Keywords. The length of the yield point, deformation in the boundary areas of grains, intragrain deformation, localization of plastic deformation, the ability to strain hardening.

For citation. Fetisov V. P. Localization of plastic deformation during deformation of low-carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 4, pp. 51-54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-51-54>.

Характерной особенностью деформирования поликристаллических металлов является неоднородность пластической деформации как в пределах одного зерна, так и для макрообъемов при одновременном деформировании всех зерен в начальной стадии и на различную величину при последующей одновременной деформации. Внешним проявлением локализации пластической деформации в начальной стадии является образование площадки текучести на диаграммах деформации, длина которой отражает общий уровень неоднородности деформации [1].

Наиболее ярко локализация пластической деформации проявляется при низкотемпературном деформировании [2]. Для заданных условий деформирования (скорость и температура) существует определенной величины средняя критическая деформация, равная длине площадки текучести, на которую локально удлиняются отдельные макрообъемы, нарушая сплошность металла. При этом понижение температуры деформации ниже комнатной и повышение скорости деформирования существенно увеличивают длину площадки текучести.

Влияние повышенных температур деформации на длину площадки текучести представлено в работе [3]. Для нормализованных углеродистых сталей 10 и 45 в области температур динамического деформационного старения наблюдается увеличение параметра локализации пластической деформации. Аналогичное изменение длины площадки текучести обнаружено при уменьшении содержания углерода в стали. Однако для выявления общих закономерностей локализации пластической деформации указанные исследования необходимо дополнить влиянием структурного фактора.

В работе [4] установлена зависимость деформируемости горячекатаной и ускоренно охлажденной низкоуглеродистой катанки при однократном волочении и со сверхбольшими суммарными обжатиями от локализации пластической деформации при контроле длины площадки текучести.

Общими недостатками работ [2–4] являются отсутствие учета роли сжимающих напряжений в формировании локализации пластической деформации низкоуглеродистой стали; оценки зависимости способности металла к деформационному упрочнению от локализации пластической деформации.

Целью настоящей работы являются исследования: влияния размера зерна феррита, количества перлита, температуры, скорости и схемы деформации на изменение длины площадки текучести низкоуглеродистой стали; взаимосвязи параметра локализации пластической деформации с показателем деформационного упрочнения.

Проведенные эксперименты на сталях 15кп и 35 показали, что длина площадки текучести уменьшается при увеличении размера зерна феррита, повышении количества перлита в стали и при переходе от деформации растяжением к сжатию (рис. 1). Рост температуры деформации приводит к уменьшению длины площадки текучести. Однако для температур развития динамического деформационного старения [5] отмечается повышение длины площадки текучести, причем в большой степени для крупнозернистой стали, но при этом уровень значений при комнатной температуре не достигается (рис. 2). Повышение скорости деформации обеспечивает увеличение длины площадки текучести независимо от температуры деформирования, но более интенсивно для мелкозернистой стали (рис. 2).

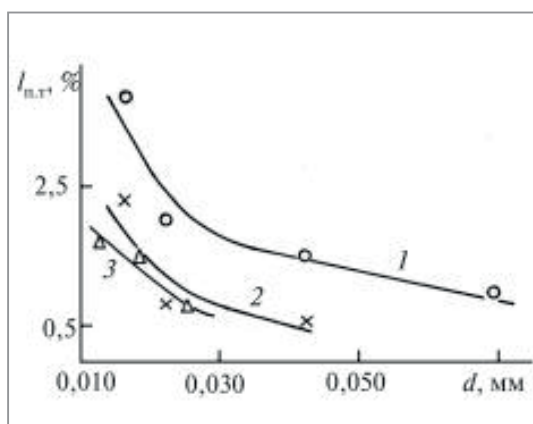


Рис. 1. Влияние размера зерна феррита (d) на длину площадки текучести ($l_{п.т.}$) стали 15кп (1, 2) и стали 35 (3) при деформации растяжением (1, 3) и сжатием (2) со скоростью 10^{-3} с^{-1} при температуре 20°C

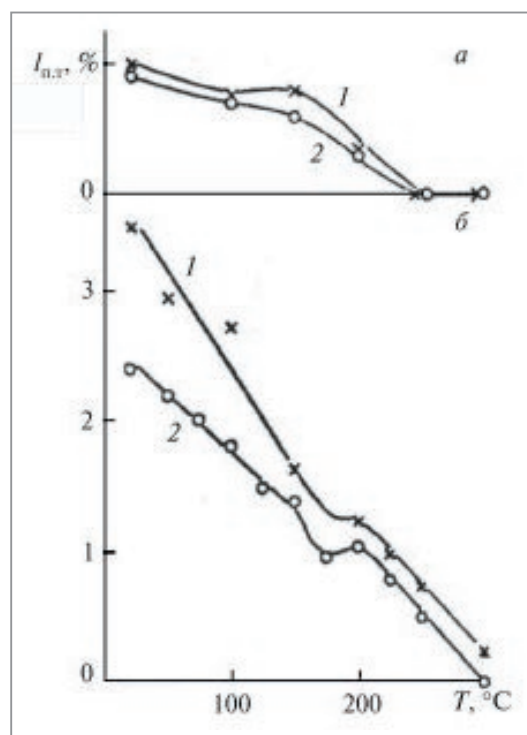


Рис. 2. Влияние температуры деформации (T) на длину площадки текучести ($l_{п.т.}$) стали 15кп в зависимости от скорости деформации (1 – 10^{-3} с^{-1} ; 2 – 10^{-4} с^{-1}) и размера зерна феррита (а – 0,11 мм; б – 0,016 мм)

Выполненный в работе [1] анализ дислокационной структуры железа при деформировании в области площадки текучести позволил определить особенности распределения дислокаций и остаточных деформаций, ответственных за локализацию пластической деформации: преимущественная остаточная деформация в приграничных областях зерен усиливает неоднородность пластической деформации (увеличение длины площадки текучести), а внутризеренная деформация уменьшает локализацию пластической деформации (снижение длины площадки текучести).

Контроль дислокационной структуры стали с содержанием углерода 0,15% показал [6], что при деформировании до верхнего предела текучести имеет место более интенсивное генерирование свежих дислокаций в приграничных областях ферритных зерен. В результате плотность дислокаций в границах зерен больше, чем в объеме зерна. Следовательно, увеличение общей протяженности границ в мелкозернистой стали должно приводить к усилению локализации пластической деформации с уменьшением размера зерна феррита и соответственно к повышению длины площадки текучести, что подтверждается экспериментальными данными (см. рис. 1). При этом увеличение сопротивления движению дислокаций

с ростом скорости деформирования способствует дальнейшему усилению локализации пластической деформации и повышению длины площадки текучести (рис. 2).

Активизация источников дислокаций внутри зерна в стали 15кп для сжимающих напряжений усиливает внутризеренную деформацию, обеспечивая снижение локализации пластической деформации и уменьшение длины площадки текучести при деформировании сжатием (см. рис. 1).

Исследования дислокационной структуры сталей 15кп и 35 с сопоставимыми размерами зерна феррита, деформированных на длину площадки текучести [5], выявили более высокую плотность дислокаций в ферритных участках, примыкающих к перлиту, по сравнению с зернами, не контактирующими со второй фазой. Кроме того, пластическая деформация распространяется также на феррит в перлите. Указанный характер дислокационной структуры обеспечивает увеличение доли внутризеренной деформации в стали 35 и, тем самым, снижение длины площадки текучести с увеличением количества перлита в стали (см. рис. 1).

Влияние размера зерна феррита в сталях 15кп и 35 на длину площадки текучести ($\ell_{пт}$) и показатель деформационного упрочнения (n) при деформации растяжением со скоростью 10^{-4} с^{-1} и температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Показатель	Размер зерна феррита d , мм							
	Сталь 15 кп					Сталь 35		
	0,016	0,022	0,042	0,069	0,11	0,012	0,018	0,025
σ_B , Н/мм ²	406,7	386,1	365,5	345,0	329,3	527,2	489,0	480,2
$\ell_{пт}$, %	2,40	1,49	1,30	1,0	0,91	1,53	1,38	0,63
$Y\ell_{пт} = \frac{1}{\ell_{пт}}$	0,42	0,67	0,77	1,0	1,10	0,65	0,72	1,59
n	0,20	0,33	0,34	0,35	0,37	0,28	0,32	0,33

Приведенные в таблице результаты исследований отражают для различного структурного состояния взаимосвязь длины площадки текучести и показателя деформационного упрочнения n в известном уравнении $\sigma = K\varepsilon^n$ (σ и ε – истинные напряжение и деформация; K – коэффициент упрочнения). Обратная пропорциональная зависимость $\ell_{пт}$ и n от размера зерна феррита свидетельствует, что уменьшение локализации пластической деформации способствует росту склонности низкоуглеродистой стали к деформационному упрочнению.

Увеличение в начальной стадии деформирования крупнозернистой стали плотности дислокаций в теле зерна при внутризеренной деформации обеспечивает по мере повышения степени деформации снижение плотности подвижных дислокаций при взаимодействии движущихся дислокаций с лесом дислокаций, что наряду с усилением блокировки дислокаций атомами внедрения при увеличении размера зерна феррита [7] приводит к росту показателя деформационного упрочнения (см. таблицу).

Повышение способности к деформационному упрочнению низкоуглеродистой стали характерно также для деформации сжатием по сравнению с растяжением [7].

Применение обратной величины длины площадки текучести (показатель $Y\ell_{пт}$) в качестве параметра локализации пластической деформации позволяет сопоставить структурную чувствительность показателей $Y\ell_{пт}$ и n : отношение $Y\ell_{пт}$ для экстремальных размеров зерна феррита составляет 2,62 против 1,85 для n (сталь 15кп) и 2,45 против 1,18 для стали 35.

Таким образом, уменьшение локализации пластической деформации с ростом размера зерна феррита и для сжимающих напряжений способствует повышению склонности низкоуглеродистой стали к деформационному упрочнению, а контроль показателя $Y\ell_{пт}$ может служить дополнительным критерием способности металла к деформационному упрочнению. В свою очередь, при волочении низкоуглеродистой катанки увеличение способности металла к деформационному упрочнению и уменьшение локализации пластической деформации, повышая коэффициент запаса прочности и однородность процесса деформирования, обеспечивают рост максимально допустимых единичных обжатий при сверхбольших суммарных деформациях [4].

Выводы

1. Уменьшение размера зерна феррита и количества перлита, повышение скорости деформирования, развитие процессов динамического деформационного старения и растягивающие напряжения усиливают локализацию пластической деформации при деформировании низкоуглеродистой стали.

2. Сжимающие напряжения в схеме деформирования снижают локализацию пластической деформации.

3. Уменьшение локализации пластической деформации способствует повышению склонности металла к деформационному упрочнению и росту деформируемости при волочении низкоуглеродистой стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова, В. С.** Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко, В. Н. Геминов и др. М.: Наука, 1965, 180 с.
2. **Попов, К. В.** Низкотемпературная хрупкость стали и деталей машин / К. В. Попов, В. Г. Савицкий. М.: Машиностроение, 1969, 192 с.
3. **Бабич, В. К.** Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. М.: Metallurgiya, 1972, 320 с.
4. **Фетисов, В. П.** Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 61–63.
5. **Фетисов, В. П.** Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996. 120 с.
6. **Терентьев, В. Ф.** Особенности протекания пластической деформации ОЦК металлов в области микротекучести / В. Ф. Терентьев, Л. Г. Орлов, В. Г. Пойда // Проблемы прочности. 1972. № 9. С. 34–37.
7. **Фетисов, В. П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. М.: Мир, 2005, 200 с.

REFERENCES

1. **Ivanova V.S., Gordienko L.K., Geminov V.N.** *Rol' dislokacij v uprochnenii i razrushenii metallov* [The Role of Dislocations in hardening and fracture of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 180 p.
2. **Popov K.V., Savickij V.G.** *Nizkotemperaturnaya hrupkost' stali i detalej mashin* [Low-temperature brittleness of steel and machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 192 p.
3. **Babich V.K., Gul' Yu. P., Dolzhenkov I. E.** *Deformacionnoe starenie stali* [Strain aging of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972, 320 p.
4. **Fetisov V.P.** Kontrol' deformiruемости pri volochenii nizkouglerodistoj katanki [Deformability control when drawing low-carbon wire rod]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 61–63.
5. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Deformational aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
6. **Terent'ev V.F., Orlov L.G., Pojda V.G.** Osobennosti protekaniya plasticheskoj deformacii OCK metallov v oblasti mikrotekuchesti [Features of the flow of plastic deformation of bcc metals in the region of microfluidity]. *Problemy prochnosti = Strength issues*, 1972, no. 9, pp. 34–37.
7. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.