



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-60-62>
УДК 669

Поступила 26.10.2023
Received 26.10.2023

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗНОНАПРАВЛЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕЛКО- И КРУПНОЗЕРНИСТОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

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

Увеличение относительного удлинения с повышением размера зерна феррита обусловлено ростом интенсивности деформационного упрочнения в области равномерной деформации. Повышение относительного сужения с уменьшением размера зерна феррита связано с преимущественным направлением расширения центральной трещины вдоль оси растяжения и снижением интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации.

Ключевые слова. Интенсивность деформационного упрочнения, размер ячеек, направление расширения трещины, степень развития шейки.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Структурные аспекты разнонаправленного формирования пластических свойств мелко- и крупнозернистой низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2024. № 1. С. 60–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-60-62>.

STRUCTURAL ASPECTS OF THE DIVERSE FORMATION OF PLASTIC PROPERTIES OF FINE AND COARSE-GRAINED LOW-CARBON STEEL

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

An increase in the relative elongation with an increase in the ferrite grain size is due to an increase in the intensity of deformation hardening in the area of uniform deformation. An increase in the relative narrowing with a decrease in the size of the ferrite grain is associated with the predominant direction of expansion of the central crack along the axis of tension and with a decrease in the intensity of deformation hardening in the area of local deformation.

Keywords. Intensity of deformation hardening, cells' size, the direction of crack expansion, neck development degree.

For citation. Fetisov V.P. Structural aspects of the diverse formation of plastic properties of fine and coarse-grained low-carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 1, pp. 60–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-60-62>.

Повышение дисперсности структуры в низкоуглеродистой стали сопровождается разнонаправленным изменением пластических свойств. Так, при уменьшении размера зерна феррита в стали 15кп относительное удлинение с повышением прочности снижается, а относительное сужение возрастает [1].

Отсутствие общей закономерности в изменении показателей пластичности в зависимости от структурного фактора требует дополнительного рассмотрения формирования пластических свойств при испытаниях на растяжение низкоуглеродистой стали.

В табл. 1 [1] представлено влияние размера зерна феррита в стали 15кп на изменение временного сопротивления разрыву (σ_B), показателей относительного сужения (Ψ) и относительных удлинений: полного ($\delta_{\text{полн}}$), равномерного ($\delta_{\text{равн}}$) и локального ($\delta_{\text{лок}} = \delta_{\text{полн}} - \delta_{\text{равн}}$), а также показателя деформационного упрочнения (n) в известном уравнении $\sigma = K\varepsilon^n$.

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита в стали 15кп на некоторые показатели при деформации растяжением со скоростью 10^{-4} с $^{-1}$ и температуре 20 °С

Показатель	Размер зерна феррита, мм				
	0,016	0,022	0,042	0,069	0,110
Временное сопротивление σ_B , Н/мм 2	406,7	386,1	365,5	345,0	329,3
Деформационное упрочнение n	0,20	0,33	0,34	0,35	0,37
Относительное сужение Ψ , %	70,0	70,0	69,0	67,0	67,0
Относительное удлинение полное $\delta_{\text{полн}}$, %	31,0	32,0	32,0	32,0	33,0
Относительное удлинение равномерное $\delta_{\text{равн}}$, %	22,0	25,0	26,0	26,0	27,0
Относительное удлинение локальное $\delta_{\text{лок}}$, %	9,0	7,0	6,0	6,0	6,0

Приведенные результаты свидетельствуют, что полное относительное удлинение прямо пропорционально величине равномерного удлинения и показателю деформационного упрочнения, а относительное сужение – величине локального удлинения.

Характерной особенностью деформирования крупнозернистой стали на стадии однородной деформации является повышение доли внутризеренной деформации, что, наряду с усилением блокировки дислокаций атомами внедрения при увеличении размера зерна феррита [2, 3], обеспечивает снижение плотности подвижных дислокаций при взаимодействии движущихся дислокаций с лесом дислокаций, рост показателя деформационного упрочнения и, соответственно, равномерного удлинения [4]. При этом увеличение с ростом размера зерна феррита доли равномерного удлинения с 71,0 до 81,8% обеспечивает повышение полного относительного удлинения для крупнозернистой стали (табл. 1). Поэтому можно считать, что величина относительного удлинения контролируется интенсивностью деформационного упрочнения в области равномерной деформации и возрастает с повышением способности к упрочнению при увеличении размера зерна феррита.

Показатель сужения площади поперечного сечения при растяжении зависит от степени развития шейки и характеризуется величиной локального удлинения.

Металлографические исследования показали [5], что на ранних стадиях формирования шейки выявляются лишь следы сдвиговой деформации в виде грубых полос скольжения. На более поздней стадии просматриваются мелкие поры, которые постепенно увеличиваются в результате их слияния и вытягиваются под действием осевого напряжения. Процесс слияния вытянутых пор заключается в разрушении мостиков между соседними порами и сопровождается образованием центральной трещины.

Среди всех этапов развития шейки (зарождение несплошностей, их рост и объединение, образование трещины и ее продвижение до момента окончательного разрушения) критическим является зарождение несплошностей.

Сохранение влияния дисперсности исходной структуры на изменение интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации и ее снижение в мелкозернистой стали [4] способствуют увеличению степени деформации, необходимой для повышения напряжений до величины, вызывающей зарождение несплошностей, и одновременно росту развития шейки [6]. Наряду с этим важное значение имеет преимущественное направление расширения центральной трещины: вдоль оси растяжения или от центра к периферии. Расширение в плоскости нормальной оси растяжения обеспечивает уменьшение развития шейки вплоть до ее полного отсутствия [5].

С уменьшением размера зерна феррита образовавшаяся в области сосредоточенной деформации субструктура обеспечивает замедление роста центральной трещины от центра к периферии стенками ячеек при снижении их размеров в мелкозернистой стали [4], что сопровождается увеличением развития шейки.

Суммарным эффектом влияния отмеченных деформационных и структурных факторов на формирование шейки в стали с более дисперсной структурой является повышение локального удлинения и величины относительного сужения с уменьшением размера зерна феррита (табл. 1).

В свою очередь характерное для крупнозернистого металла дополнительное снижение плотности подвижных дислокаций и усиление локализации пластической деформации способствуют повышению склонности к образованию дефектов структуры, что, по сравнению с мелкозернистой сталью, вызывает противоположный характер формирования шейки.

Таким образом, разнонаправленное изменение относительного удлинения (рост с увеличением размера зерна феррита) и относительного сужения (повышение для более дисперсной структуры) связано:

- с повышением интенсивности деформационного упрочнения в области равномерной деформации – для крупнозернистой стали;
- со снижением интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации и преимущественным направлением расширения центральной трещины вдоль оси растяжения – для мелкозернистой стали.

Одно из проявлений разнонаправленности – влияние на общую зависимость пластических свойств от размера зерна феррита.

Снижение интенсивности деформационного упрочнения на стадии неустойчивой деформации для более дисперсной структуры позволяет повысить вклад в изменение соотношения напряжений доли от уменьшения поперечного сечения, но ограничивает прирост относительного сужения и через $\delta_{\text{лок}}$ степень понижения относительного удлинения. В результате для низкоуглеродистой стали фиксируется

достаточно слабая структурная чувствительность пластических свойств. Так, при различии экстремальных значений размера зерна феррита в 6,9 раза относительное сужение изменяется на 3 %, а относительное удлинение – на 2 % (табл. 1).

Проведенный анализ формирования традиционных пластических свойств при испытаниях на растяжение свидетельствует, что наблюдаемое разнонаправленное изменение показателей пластичности в зависимости от дисперсности структуры является характерной особенностью деформации низкоуглеродистой стали, в отличие от перлитной стали 80 [7]. Поэтому назначение для контроля показателя пластичности должно осуществляться исходя из конкретного применения материала. Так, для многократного с большими суммарными обжатиями волочения низкоуглеродистой катанки требуется определение показателей относительного удлинения, которые через интенсивность деформационного упрочнения надежно характеризуют деформируемость металла [2].

Выводы

1. Разнонаправленное изменение показателей удлинения и сужения в зависимости от размера зерна феррита отражает специфику деформации растяжением низкоуглеродистой стали.
2. Повышение относительного удлинения крупнозернистой стали обусловлено ростом интенсивности деформационного упрочнения в области равномерной деформации.
3. Увеличение относительного сужения мелкозернистой стали связано со снижением интенсивности деформационного упрочнения в области локальной деформации и преимущественным направлением расширения центральной трещины при развитии шейки вдоль оси растяжения.
4. Выбор надежного показателя пластичности необходимо выполнять для конкретных условий переработки или эксплуатации низкоуглеродистой стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов, В.П.** Исследование локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали / В.П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 1. – С. 85–87.
2. **Фетисов, В.П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали / В.П. Фетисов. – М.: Мир, 2005. – 200 с.
3. **Фетисов, В.П.** Локализация пластической деформации при деформировании низкоуглеродистой стали / В.П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 4. – С. 51–54.
4. **Моррисон, В.Б.** Пластичность сплавов со сверхмелким зерном / В.Б. Моррисон, Р.Л. Миллер // *Сверхмелкое зерно в металлах: сб.* – М.: Металлургия, 1973. – С. 181–205.
5. **Хоникомб, Р.** Пластическая деформация металлов / Р.Хоникомб. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
6. **Вигли, Д.А.** Механические свойства материалов при низких температурах / Д.А. Вигли. – М.: Мир, 1974. – 374 с.
7. **Фетисов, В.П.** Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали / В.П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 61–63.

REFERENCES

1. **Fetisov V.P.** Issledovanie lokalizacii plasticheskoj deformacii pri rastjazhenii nizkouglerodistoj stali [Investigation of localization of plastic deformation during stretching of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 85–87.
2. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Strain hardening of carbon steel]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
3. **Fetisov V.P.** Lokalizacija plasticheskoj deformacii pri deformirovanii nizkouglerodistoj stali [Localization of plastic deformation during deformation of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 51–54.
4. **Morrison V.B., Miller R.L.** Plastichnost' spлавov so sverhmelkim zernom [Plasticity of alloys with ultrafine grains]. *Sverhmelkoe zerno v metallah = Ultrafine grains in metals*, 1973, pp. 181–205.
5. **Honikomb R.** *Plasticheskaja deformacija metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow, Mir Publ., 1972, 408 p.
6. **Vigli D.A.** *Mehanicheskie svojstva materialov pri nizkih temperaturah* [Mechanical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mir Publ., 1974, 374 p.
7. **Fetisov V.P.** Formirovanie plasticheskikh svojstv pri deformacii rastjazheniem perlitnoj stali [Formation of plastic properties during deformation stretching of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 61–63.