



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-51-54>
УДК 669.35-157:539.26

Поступила 05.09.2023
Received 05.09.2023

КОНТРОЛЬ ПЛАСТИЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО СОСТОЯНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

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

Относительное сужение термообработанной заготовки из перлитной стали характеризует общий уровень пластических и технологических свойств холоднодеформированной с большими суммарными обжатиями проволоки. Уменьшение межпластинчатого расстояния при термообработке и в процессе пластической деформации повышает, а потеря при многократном волочении пластинчатого строения с повышением плотности дислокаций внутри ячеек в феррите и дополнительное снижение подвижности дислокаций при их блокировке атомами углерода при распаде цементита снижают пластичность холоднодеформированной перлитной стали.

Ключевые слова. Дисперсность перлита, пластинчатое строение перлита, распад цементита, механизмы деформационного упрочнения, подвижность дислокаций.

Для цитирования. Фетисов, В.П. Контроль пластичности высокопрочного состояния холоднодеформированной перлитной стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2024. № 1. С. 51–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-51-54>.

CONTROL OF PLASTICITY OF HIGH-STRENGTH CONDITION OF COLD-FORMED PEARLITIC STEEL

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

The relative narrowing of the heat-treated pearlite steel billet characterizes the overall level of plastic and technological properties of the cold-formed wire with large total compressions. The reduction of the interplate distance during heat treatment and during plastic deformation is increased, and the loss during repeated drawing of the plate structure with an increase in the density of dislocations inside the cells in ferrite and an additional decrease in the mobility of dislocations when they are blocked by carbon atoms during the decay of cementite reduce the plasticity of cold-formed pearlite steel.

Keywords. Dispersion of perlite, lamellar perlite structure, cementite decay, deformation hardening mechanisms, mobility of dislocations.

For citation. Fetisov V.P. Control of plasticity of high-strength condition of cold-formed pearlitic steel. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 1, pp. 51–54. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-51-54>.

В [1] рассмотрена роль взаимосвязанных процессов микро- и макроразрушения на формирование при испытаниях на растяжение пластических свойств термообработанной перлитной стали с различной дисперсностью структуры. Относительное сужение и относительное удлинение возрастают с уменьшением межпластинчатого расстояния в перлите, причем повышенная структурная чувствительность отмечается при контроле относительного сужения. Среди всех микроструктурных явлений развития шейки (зарождение несплошностей, их рост и объединение, образование трещины и ее продвижение до момента окончательного разрушения) критическим является зарождение несплошностей, а для стадии макроразрушения превалирующим фактором служит показатель интенсивности деформационного упрочнения, изменяющий соотношения напряжений от уменьшения поперечного сечения и вследствие деформационного упрочнения. Установлено, что влияние повышения дисперсности пластинчатого перлита на увеличение относительного сужения обусловлено снижением роли процессов микроразрушения в области равномерной и локальной деформации и повышением интенсивности деформационного упрочнения на стадии сосредоточенной деформации, связанное с дополнительным упрочнением при взаимодействии дислокаций с атомами углерода при распаде цементита и со снижением релаксации напряжений из-за образования несплошностей структуры.

Для оценки надежности относительного сужения в качестве характеристики высокопрочного состояния перлитной стали практический интерес представляют исследования взаимосвязи данного параметра

пластичности металла после термообработки и в процессе многократного волочения с большими суммарными обжатиями.

Целью настоящей работы является анализ зависимости относительного сужения проволоки от суммарного обжатия при многократном волочении перлитной стали с различной дисперсностью структуры.

В табл. 1 [2] представлено изменение механических свойств холоднодеформированной проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А в зависимости от степени суммарной деформации ($Q_{\text{сум}}$) волочением с единичными обжатиями 18%.

Таблица 1. Влияние суммарной степени деформации ($Q_{\text{сум}}$, $\ln m$) при многократном волочении на механические свойства холоднодеформированной проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А

Суммарная деформация $Q_{\text{сум}}$, %	Логарифм вытяжки $\ln m$	Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$, Н/мм ²	Относительное сужение Ψ , %	Число скручиваний	$P_{\text{узл}} / P$, %
0	0	1332,8	37	41	57
10	0,110	1450,4	37	35	58
30	0,365	1607,2	42	34	60
50	0,700	1675,8	51	34	62
70	1,200	1881,6	53	34	58
90	2,300	2312,8	46	33	58

В исходном патентированном состоянии относительное сужение $\Psi = 37\%$. Несмотря на рост прочностных свойств, с увеличением $Q_{\text{сум}}$ до 30–70% относительное сужение повышается до 42–53%. Однако дальнейшее увеличение суммарного обжатия до 90% сопровождается снижением Ψ до 46%. Обращает на себя внимание, что для тонкого волочения наблюдается повышенная деформационная чувствительность относительного сужения по сравнению с такими технологическими характеристиками, как число скручиваний и отношение усилий разрыва проволоки с узлом и в исходном состоянии ($P_{\text{узл}} / P$).

Аналогичный характер изменения относительного сужения в зависимости от степени деформации отмечается при контроле на образцах проволоки по переходам многократного волочения. Так, при волочении патентированной заготовки диаметром 4,85 мм из стали У8А с суммарным 86,4% и единичными 22% обжатиями максимум относительного сужения $\Psi = 56\%$ приходится на $Q_{\text{сум}} = 70\%$ [3].

Влияние дисперсности тонкопластинчатого перлита исследовано в [4] на примере структур сорбита патентирования и кратковременного электроотпуска после закалки при многократном волочении исходной заготовки диаметром 4,0 мм из стали У8 с суммарным обжатием 90%. При этом экспериментальные данные [4] показали следующие результаты.

Термообработанная заготовка характеризовалась: $\sigma_{\text{в}} = 1313$ Н/мм², $\Psi = 32\%$ после патентирования; $\sigma_{\text{в}} = 1617$ Н/мм², $\Psi = 35\%$ после электроотпуска, что обусловлено уменьшением межпластиночного расстояния и более дисперсной тонкопластинчатой формой цементитных пластин в сорбите электроотпуска. Различия в прочности и пластичности сохраняются и после $Q_{\text{сум}} = 90\%$: $\sigma_{\text{в}} = 2460$ Н/мм², $\Psi = 40\%$ для патентирования; $\sigma_{\text{в}} = 2940$ Н/мм², $\Psi = 46\%$ после электроотпуска. По мере роста суммарного обжатия относительные сужения повышаются до $\Psi = 54\%$, но для электроотпуска максимум значений приходится на $Q_{\text{сум}} = 84\%$ по сравнению с $Q_{\text{сум}} = 69\%$ для патентирования.

Для выяснения особенностей характерного для патентированной перлитной стали разнонаправленного формирования пластических свойств по мере роста суммарного обжатия рассмотрим изменения структуры и механизмов деформационного упрочнения в процессе многократного волочения.

Анализ влияния истинной степени деформации при волочении (логарифм вытяжки $\ln m$) на изменение прочностных свойств (табл. 1) выявляет наличие трех областей суммарных обжатий с различной скоростью деформационного упрочнения: $d\sigma_{\text{в}}/d\ln m$ (A): до 0,365 ($A_1 = 76,7$); 0,365–1,200 ($A_2 = 33,5$) и 1,200–2,300 ($A_3 = 40$).

Проведенные в [4–6] исследования формирования структуры с увеличением суммарного обжатия и выполненный ранее [7] анализ механизмов деформационного упрочнения при многократном волочении перлитной стали позволяют установить следующую связь структуры, механизмов и показателей упрочнения.

Начальная стадия пластической деформации патентированной заготовки характеризуется сильным увеличением плотности дислокаций в ферритной матрице. Дислокационная структура состоит

преимущественно из плотных клубков, которые при дальнейшей деформации формируются в стенки ячеистой структуры. Уменьшение подвижности дислокаций приводит к интенсивному упрочнению ($A_1 = 76,7$) проволоки по механизму пересечения дислокаций.

После образования ячеистой структуры в феррите рост суммарной степени деформации во второй области сопровождается уменьшением расстояния между субструктурными барьерами (границами ячеек). Поперечный размер ячеек, который совпадает с межпластиночным расстоянием в перлите, уменьшается при волочении пропорционально диаметру проволоки. Наблюдаемая очистка ферритных промежутков от дислокаций приводит к минимизации упрочнения по типу леса дислокаций, прирост прочности обусловлен субструктурным упрочнением ($A_2 = 33,5$) при уменьшении межпластиночного расстояния (размера ячеек).

Рост скорости деформационного упрочнения в третьей области ($A_3 = 40$) вызван образовавшейся после сверхбольших суммарных обжатий субструктурой со смешанными дислокационно-карбидными границами и с повышенной плотностью дислокаций внутри ячеек в феррите, обеспечивающей дополнительное упрочнение по типу леса дислокаций. Кроме того, уменьшению подвижности дислокаций и увеличению прироста прочности способствует также усиление блокировки дислокаций атомами углерода при распаде цементита.

Применительно к формированию пластических свойств проволоки при многократном волочении перлитной стали приоритетное значение имеет также поведение при деформации пластин цементита: их ориентация, сохранение формы и дробление. Глубокое изучение накопления дефектности карбидной фазы при деформации волочением выполнено в [3–6].

Обжатие на 15% стали с тонкопластинчатой структурой вызывает некоторую деформацию цементитных пластин, состоящую в повороте пластин вдоль оси волочения и в начинающемся процессе их дробления. Деформация на 40% обнаруживает еще большее дробление и поворот цементитных пластин. Наиболее разрушаются карбидные пластинки, ориентированные почти перпендикулярно оси проволоки. После 50% деформации продолжается ориентация перлитных колоний вдоль оси волочения. Цементитные пластины утончаются в поперечном сечении и удлиняются в продольном. В области сверхбольших суммарных обжатий пластины цементита претерпевают существенные изменения: следы сильной пластической деформации в виде вытяжек, разрывов и дробления. Прерывистости пластин карбидной фазы способствуют также процессы распада цементита при пластической деформации. Заключительная стадия деформационных и диффузионных преобразований в карбидной фазе – потеря пластинчатого строения перлита.

Сопоставление изменений при многократном волочении механизмов деформационного упрочнения, состояния карбидной фазы и величины относительного сужения (табл. 1) позволяет считать, что упорядочение структуры за счет преимущественной ориентации пластин цементита вдоль оси проволоки и уменьшение межпластиночного расстояния способствуют повышению показателя степени сужения площади поперечного сечения металла при растяжении, а потеря пластинчатого строения перлита, повышение плотности дислокаций внутри ячеек в феррите и усиление блокировки дислокаций атомами углерода при распаде цементита сопровождаются уменьшением относительного сужения холоднодеформированной проволоки.

Выявленное в [4] смещение максимума относительного сужения в область повышенных суммарных обжатий при увеличении дисперсности перлита в исходной заготовке подтверждает определяющую роль величины межпластиночного расстояния и сохранения пластинчатого строения эвтектоида на формирование пластических свойств холоднодеформированной проволоки.

Выводы

1. Уменьшение межпластиночного расстояния при термообработке и в процессе пластической деформации сопровождается ростом относительного сужения перлитной стали.
2. Потеря в процессе многократного волочения с большими суммарными обжатиями пластинчатого строения перлита с повышением плотности дислокаций в теле ячеек и с их дополнительной блокировкой атомами углерода при распаде цементита вызывают снижение показателя степени сужения площади поперечного сечения проволоки при растяжении.
3. Величина относительного сужения термообработанной заготовки из перлитной стали характеризует пластические и технологические свойства холоднодеформированной проволоки до сверхбольших суммарных обжатий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов, В. П.** Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 61–63.
2. **Красильников, Л. А.** Релаксационная стойкость и циклическая прочность холоднотянутой проволоки / Л. А. Красильников, В. Я. Зубов. – М.: Металлургия, 1970. – 68 с.
3. **Потемкин, К. Д.** Термическая обработка и волочение высокопрочной проволоки / К. Д. Потемкин. – М.: Металлургиздат, 1963. – 120 с.
4. **Гриднев, В. Н.** Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 231 с.
5. **Embury, J.** The structure and properties of drawn pearlite / J. Embury, R. Fisher // *Acta Metallurgica*. – 1966. – Vol. 14, iss. 2. – P. 147–159.
6. **Embury, J.** Substructural strengthening in materials subject to large plastic strains / J. Embury, A. Keh, R. Fisher // *Trans. Met. Soc. ALME*. – 1966. – Vol. 236, iss. 9. – P. 1252–1260.
7. **Фетисов, В. П.** Пластичность высокопрочной проволоки / В. П. Фетисов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2011. – 128 с.

REFERENCES

1. **Fetisov V.P.** Formirovanie plasticheskikh svoystv 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.
2. **Krasil'nikov L. A., Zubov V. Ja.** *Relaksacionnaja stojkost' i ciklicheskaja prochnost' holodnotjanutoj provoloki* [Relaxation resistance and cyclic strength of cold-drawn wire]. Moscow, Metallurgija Publ., 1970, 168 p.
3. **Potemkin K. D.** *Termicheskaja obrabotka i volochenie vysokoprochnoj provoloki* [Heat treatment and drawing of high tensile wire]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963, 120 p.
4. **Gridnev V. N., Gavriljuk V. G., Meshkov Ju. Ja.** *Prochnost' i plastichnost' holodnodeformirovannoj stali* [Strength and ductility of cold-worked steel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974, 231 p.
5. **Embury J., Fisher R.** The structure and properties of drawn pearlite. *Acta Metallurgica*, 1966, vol. 14, iss. 2, pp. 147–159.
6. **Embury J., Keh A., Fisher R.** Substructural strengthening in materials subject to large plastic strains. *Trans. Met. Soc. ALME*, 1966, vol. 236, iss. 9, pp. 1252–1260.
7. **Fetisov V.P.** *Plastichnost' vysokoprochnoj provoloki* [Ductility of high tensile wire]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2011, 128 p.