



It is shown that decrease of plasticity of high-strength wire at big total cobbings is connected with reduction of mobility of dislocations in the substructure formed at loss of perlite lamellar structure.

В. П. ФЕТИСОВ, БМЗ (1993–1999 гг.)

УДК 669.74

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ СНИЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ БОЛЬШИХ СУММАРНЫХ ОБЖАТИЯХ

Высокий уровень прочности латунированной проволоки для металлокорда достигается при многократном волочении с большими суммарными обжатиями патентованной высокочистой перлитной стали. Однако потеря пластичности металла в процессе деформации ограничивает предельно допустимые суммарные обжатия, дальнейший рост прочности и промышленную реализацию полученного высокопрочного состояния. Поэтому знание физической природы перехода холоднодеформированной стали от пластического к хрупкому состоянию позволит целенаправленно планировать исследования на сталеплавильном, прокатном и сталепроволочном передлах по разработке комплекса мер, направленных на сохранение запаса пластичности высокопрочной проволоки.

Начальная стадия пластической деформации перлитной стали (после первой протяжки) приводит к сильному увеличению плотности дислокаций в ферритной матрице. Дислокационная структура состоит преимущественно из плотных клубков, которые при дальнейшей деформации формируются в стенки ячеистой структуры [1]. Наличие цементита в перлитной стали способствует образованию более тонкой субструктуры феррита в процессе пластической деформации [2]. Уменьшение подвижности дислокаций приводит к интенсивному упрочнению проволоки, которое контролируется механизмом пересечения дислокаций.

После образования ячеистой структуры в феррите дальнейшая деформация приводит к уменьшению расстояния между субструктурными барьерами (границами ячеек). Поперечный размер ячеек, который совпадает с межпластиночным расстоянием в перлите, уменьшается при волочении пропорционально диаметру проволоки. После 50% деформации (логарифм вытяжки $\ln \epsilon = 0,69$)

перлитные колонии начинают ориентироваться вдоль оси волочения. Такая ориентация усиливается с ростом суммарного обжатия. При этом цементитные пластины утончаются в поперечном сечении и удлиняются в продольном, наблюдается деформация цементитных пластин скольжением [1], а также двойникованием [3]. В неблагоприятно ориентированных колониях происходит изгиб и дробление цементитных пластин и у их обломков наблюдаются образования дислокационных клубков, которые при дальнейшем волочении превращаются в вытянутые стенки ячеек, содержащие наряду с дислокациями измельченные частички цементита. При суммарном обжатии 80–82% ($\ln \epsilon = 1,7$) в основном заканчивается ориентация цементитных пластин вдоль оси волочения [3–5]. Электронно-микроскопическими исследованиями [1] обнаружены наличие дислокационных скоплений у границ раздела феррит-цементит и относительно малая плотность дислокаций в ферритных промежутках, что является характерной особенностью образовавшейся ячеистой структуры, имеющей преимущественную концентрацию дислокаций в стенках ячеек и практически свободное от дислокаций пространство внутри ячеек. Деформационное упрочнение на этой стадии связано в основном с уменьшением длины свободного пробега дислокаций в диспергированной структуре.

С ростом суммарного обжатия все более важную роль приобретает состояние цементита в перлитной стали. Если в патентованной структуре пластины Fe_3C являются монокристаллами, то после суммарного обжатия в 80% они, хотя еще и непрерывные, но состоят из множества дезориентированных субкристаллов [3]. На цементитных пластинах, ориентированных в исходном состоянии вдоль оси проволоки, появляются характерные

следы сильной пластической деформации в виде вытяжек и утолщений [1], а также наблюдаются разрывы пластин цементита [6]. Прерывистости цементитных пластин способствуют также процессы распада цементита при пластической деформации [7], связанные с ускоренным пластической деформацией переносом атомов углерода из цементита к дислокациям, концентрирующимся на межфазной поверхности [8].

Заключительная стадия деформационных и диффузионных преобразований в карбидной фазе – потеря пластинчатого строения перлита с ростом суммарного обжатия. Нарушение пластинчатого строения ускоряется и наступает при меньшем суммарном обжатии в перлитных колониях с первоначальной ориентацией пластин цементита, не совпадающей с осью проволоки. Образовавшаяся в участках холоднодеформированной стали с нарушенным пластинчатым строением перлита субструктура со смешанными дислокационно-карбидными границами и с повышенной плотностью дислокаций внутри ячеек в феррите [2] оказывает более сильное сопротивление движению дислокаций. Кроме того, усиливается блокировка дислокаций атомами углерода при распаде цементита, интенсивность которого возрастает с повышенным температурным воздействием при росте скорости деформации на последних переходах в маршруте волочения.

Повышение в процессе волочения степени закрепления дислокаций атомами углерода, выделяющегося при распаде цементита в твердый раствор и на межфазных границах, подтверждается следующими экспериментальными данными, приведенными в таблице. В отличие от традиционного представления о влиянии степени предварительной деформации на эффект статического деформационного старения [9] наблюдается не прирост прочности, а его уменьшение с переходом на разупрочнение проволоки (см. таблицу), что свидетельствует об усилении степени закрепления дислокаций при деформации с повышенными суммарными обжатиями. При этом применение на последнем переходе в маршруте волочения пониженного единичного обжатия (9,5% для проволоки диаметром 0,30 мм против 15–16% на остальных переходах) приводит за счет увеличения доли сжимающих напряжений в схеме деформации к наведению в дополнительных плоскостях скольжения

незакрепленных дислокаций, что сопровождается снижением эффекта разупрочнения проволоки при последующем статическом деформационном старении. Поэтому можно считать, что при суммарных обжатиях $\epsilon_{\Sigma} = 3,32$ и $3,55$ деформационное упрочнение обусловлено не только субструктурным упрочнением и механизмом пересечения дислокаций [10], но и упругим взаимодействием дислокаций с атомами углерода, выделяющегося при распаде цементита.

Суммарным эффектом нарушения пластинчатого строения перлита (формирование субструктуры со смешанными дислокационно-карбидными границами и с повышенной плотностью дислокаций внутри ячеек в феррите) и усиления распада цементита с ростом суммарного обжатия (дополнительная блокировка дислокаций атомами углерода) является резкое снижение (см. таблицу) числа переменных скручиваний, обладающих повышенной чувствительностью к степени закрепления дислокаций, наведенных при пластической деформации [11], и являющихся надежным критерием безобрывной свивки латунированной проволоки на канатных машинах двойного кручения.

Влияние суммарной степени деформации и отпуска при 250 °С, 1 ч на свойства латунированной проволоки из особо чистой стали 80

Диаметр проволоки по переходам в маршруте волочения, мм	Истинная суммарная степень деформации ϵ_{Σ} (Q_{Σ} , %)	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ²	Прирост σ_b при волочении, Н/мм ²	Число переменных скручиваний	Изменение σ_b при отпуске, Н/мм ²
0,564	2,29 (89,8)	2204	–	114	+43
0,438	2,79 (93,9)	2520	316	109	+12
0,336	3,32 (96,4)	3056	536	52	–92
0,300	3,55 (97,1)	3181	125	52	–64

Таким образом, снижение пластичности высокопрочной проволоки при больших суммарных обжатиях связано с уменьшением подвижности дислокаций в субструктуре, образовавшейся при потере пластинчатого строения перлита, и с дополнительной блокировкой дислокаций атомами углерода, выделяющегося при распаде цементита.

Технологические приемы, обеспечивающие увеличение плотности подвижных, незакрепленных дислокаций и повышение пластичности высоко-, сверхвысоко- и ультравысокопрочной латунированной проволоки для металлокорда и рукавов высокого давления, рассмотрены в работах [12, 13].

Литература

1. Embury J., Fisher R. The structure and properties of drawn pearlite // Acta Met. 1966. Vol. 14, № 2. P.147–149.
2. Кардонский В. М., Курдюмов Г. В., Перкас М. Д. Тонкая структура холоднодеформированной высокоуглеродистой стали // ФММ. 1963. Т.15. Вып.2. С. 244–253.

3. Smith B., Speirs D. New testing methods help advance strength of rope wire. // Vol. 4. № 6. P.41–50. Деп. в ВИНТИ // Прокатка и прокатное оборудование. 1971. № 46. С. 22–39.
4. Потемкин К. Д. Термическая обработка и волочение высокопрочной проволоки. М.: Metallurgizdat, 1963.
5. Электронно-микроскопическое исследование структурных изменений при волочении проволоки / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков, В. В. Яремчук // Стальные канаты. 1967. Вып.4. С. 348–353.
6. Зубов В. Я., Чупракова Н. В., Барышникова Н. Н. Влияние формы цементита на изменение тонкой структуры и свойств стальной проволоки при волочении // Изв. вузов. Черная металлургия. 1971. № 6. С. 120–123.
7. Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. Киев: Наукова думка, 1974.
8. Гаврилюк В. Г. Распределение углерода в стали. Киев: Наукова думка, 1987.
9. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972.
10. Фетисов В. П. Изменение скорости деформационного упрочнения лагунированной проволоки при больших обжатиях // Сталь. 1988. № 11. С. 55–57.
11. Фетисов В. П. Деформационное старение стали при волочении проволоки. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996.
12. Фетисов В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали. М.: Мир, 2005.
13. Фетисов В. П. Пластичность высокопрочной проволоки. М.: Интермет Инжиниринг, 2011.