



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-44-49>
УДК 669.112.33

Поступила 10.03.2022
Received 10.03.2022

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЛОЧЕНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ

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

При многократном волочении низкоуглеродистой проволоки уменьшение размера зерна феррита снижает параметры деформационного упрочнения в начальной области деформаций с параболическим упрочнением и повышает в области субструктурного упрочнения при больших и сверхбольших суммарных обжатиях. Переход от больших к сверхбольшим суммарным деформациям сопровождается развитием процессов динамического возврата, снижающих скорость деформационного упрочнения. Предварительное атермическое разупрочнение холоднотемпературной проволоки повышает прирост прочности при последующем волочении и может быть использовано для увеличения суммарного обжатия катанки до промежуточной термической обработки.

Ключевые слова. Размер зерна феррита, плотность дислокаций леса, расстояние между субструктурными барьерами, структурная неравномерность деформации, параметры деформационного упрочнения.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Структурные аспекты деформационного упрочнения при многократном волочении низкоуглеродистой проволоки / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 44–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-44-49>.

STRUCTURAL ASPECTS OF DEFORMATION HARDENING WITH REPEATED DRAWING LOW CARBON WIRE

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

While repeated drawing of low carbon wire, a decrease in the grain size of ferrite reduces the parameters of deformation hardening in the initial field of deformations with parabolic hardening and increases in the field of substructural hardening with large and extra-large total compressions. The transition from large to super-large total deformations goes along with the development of dynamic return processes that reduce the rate of deformation hardening. Preliminary thermal softening of cold-formed wire increases the strength gain during subsequent drawing and can be used to increase the total compression of the wire rod before intermediate heat treatment.

Keywords. Ferrite grain size, forest dislocations density, distance between structural barriers, structural irregularity of deformation, parameters of deformation hardening.

For citation. Fetisov V. P. Structural aspects of deformation hardening with repeated drawing low carbon wire. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 2, pp. 44–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-44-49>.

Эффективность процесса волочения низкоуглеродистой проволоки во многом определяется достигнутым уровнем единичных обжатий за переход и суммарных деформаций катанки до промежуточной термической обработки. Исходя из представлений о коэффициенте запаса прочности, повышение деформируемости катанки достигается при увеличении степени деформационного упрочнения за переход и при уменьшении напряжения волочения, в том числе за счет снижения общей прочности холоднотемпературной проволоки. Поэтому анализ и выявление закономерностей деформационного упрочнения при больших и сверхбольших суммарных обжатиях являются важным этапом совершенствования и разработки новых технологических процессов многократного волочения низкоуглеродистой проволоки.

Отправным моментом может служить фундаментальное исследование структурных изменений железа при больших пластических деформациях, выполненное Лэнгфордом и Коэном [1]. Эксперименты проводили при волочении отожженной заготовки диаметром 8,0 мм с величиной зерна 30 мкм из электролитического железа вакуумного переплава, содержащего 0,007% углерода и 0,0015% азота. Единичное обжатие за переход составляло 20% ($\ln\epsilon = 0,22$), суммарная деформация – 99,94% ($\ln\epsilon = 7,42$), а скорость волочения – 1 мм/с.

Начальная стадия пластической деформации характеризуется дислокационной структурой, состоящей преимущественно из плотных клубков (сплетений дислокаций). Повышение степени деформации более $\ln\epsilon = 0,22$ сопровождается неравномерным распределением дислокаций, обнаруживаются четкие

признаки регулярных стенок ячеек, образовавшихся вследствие выстраивания в ряд плотных дислокационных клубков. После образования ячеистой структуры дальнейшая деформация приводит к заметному снижению расстояния между субструктурными барьерами (границами ячеек) при практически полном отсутствии дислокаций внутри ячеек.

В работе [1] выявлено неодинаковое уменьшение размеров ячеек на разных этапах деформирования: вначале темп уменьшения интенсивнее диаметра проволоки, а при деформациях $\ln\mu > 2,0$ вследствие развития процессов динамического возврата (деформационного разупрочнения) темп снижения размеров ячеек замедляется.

При больших пластических деформациях размер ячеек становится основным параметром субструктуры, определяющим деформационное упрочнение (субструктурное упрочнение). При этом отсутствие дислокаций внутри ячеек исключает возможность упрочнения по типу леса дислокаций.

Применительно к волочению низкоуглеродистой катанки недостатком работы [1] является отсутствие исследования влияния исходной величины зерна феррита на параметры деформационного упрочнения при больших суммарных обжатиях. В работах [2, 3] также рассмотрено формирование субструктуры и упрочнения при больших пластических деформациях. Однако и в них отсутствуют исследования влияния исходного размера зерна феррита на параметры деформационного упрочнения.

Целью настоящего исследования является рассмотрение показателей деформационного упрочнения в широком диапазоне суммарных обжатий при многократном волочении низкоуглеродистой проволоки в зависимости от дисперсности исходной структуры катанки и отожженной заготовки.

В табл. 1–4 представлены параметры деформационного упрочнения низкоуглеродистой проволоки в трех областях суммарных обжатий ($\ln\mu$): до 0,57–0,75 в первой области, (0,57–0,75) – 2,15 – во второй и 2,15–3,65 – в третьей области.

В первой области суммарных обжатий зависимость временного сопротивления разрыву (σ_b) от истинной степени деформации при однократном волочении $\ln\mu$ (μ – вытяжка, равная отношению квадратов диаметра проволоки до и после волочения) в двойных логарифмических координатах является прямолинейной (параболическое упрочнение), что позволяет определять показатель степени деформационного упрочнения при волочении (n_b) из выражения $\sigma_b = \sigma_b(\ln\mu)^{n_b}$, соответствующего по форме известному уравнению Холломона.

В области параболической стадии деформации, в которой природа деформационного упрочнения обусловлена взаимодействием движущихся дислокаций с лесом дислокаций (механизм пересечения дислокаций), показатель n_b возрастает с увеличением размера зерна феррита (табл. 1). Причем предварительное обжатие в пределах этой области не изменяет отмеченного влияния дисперсности структуры на показатель степени деформационного упрочнения при волочении (табл. 2). Указанный характер влияния структурного состояния предопределяется повышенной концентрацией атомов внедрения в твердом растворе с увеличением размера зерна феррита [4], что сопровождается усилением блокировки дислокаций и соответственно снижением плотности подвижных дислокаций и ростом склонности крупнозернистой стали к деформационному упрочнению.

Влияние размера зерна феррита на прирост прочности при волочении в области больших суммарных обжатий приведено в табл. 3, на скорость деформационного упрочнения в интервалах больших и сверхбольших суммарных деформаций – в табл. 4. В отличие от параболического упрочнения в области субструктурного упрочнения прирост прочности и скорость деформационного упрочнения увеличиваются с повышением дисперсности структурных составляющих в низкоуглеродистой стали.

В работе [2] отмечается, что начальный размер ячеек зависит от вида материала, наличия примесей в твердом растворе, степени дисперсности частиц второй фазы и температур деформации.

Вместе с тем, свой вклад вносит также исходная величина зерна, влияя на структурную неравномерность пластической деформации начиная с параболической стадии, когда часть зерен, наиболее благоприятно ориентированных к приложенным напряжениям, деформируется раньше остальных. В свою очередь одинаковое деформирование всех зерен, внешним проявлением которого является окончание области параболического упрочнения [5], способствует повышению структурной равномерности пластической деформации. При этом для растяжения уменьшение величины зерна смещает окончание области параболического упрочнения влево по шкале деформаций [6]. Влияние уменьшения величины зерна на повышение равномерности деформации сохраняется и для прокатки с большими суммарными деформациями [7]. Применительно к процессу многократного волочения низкоуглеродистой стали влияние размера зерна феррита на структурную равномерность пластической деформации можно проследить при контроле преимущественной ориентации структурных составляющих вдоль оси проволоки.

Таблица 1. Влияние структуры на показатель степени деформационного упрочнения при волочении n_b низкоуглеродистой катанки

Марка стали, содержание углерода, %	Температура смотки катанки в бунт, °С, размер зерна феррита, балл	Временное сопротивление разрыву катанки, Н/мм ²	n_b
Ст0М C = 0,11	800 7–8	369,8	0,21
	700 8–9	386,9	0,19
	600 10–11	492,7	0,14

Таблица 2. Влияние структуры и предварительной деформации проволоки из стали Ст0М на изменение показателя степени деформационного упрочнения при волочении n_b

Характеристика заготовки				n_b
предварительная термообработка	степень предварительной деформации, % (Iпц)	диаметр, мм	временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	
Отжиг в протяжных печах	35 (0,43)	2,0	617,4	0,075
Отжиг в печи с роликовым подом			546,8	0,088
Отжиг в колпаковых печах			466,5	0,102

Таблица 3. Влияние многократного волочения отожженной в протяжных печах заготовки диаметром 2,5 мм на механические свойства низкоуглеродистой проволоки диаметром 1,0 мм

Характеристика заготовки			Параметры процесса волочения		Механические свойства проволоки		
марка стали, содержание углерода, %	величина зерна феррита, балл	временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	суммарное обжатие, % (Iпц)	среднее единичное обжатие, %	временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	число перегибов	прирост прочности при волочении, Н/мм ²
Ст0 C=0,15	10–11	396,9	84 (1,83)	23	999,6	10	602,7
	8–9	379,3			940,8	9	561,5
Ст3кп C=0,20	11	485,1	84 (1,83)	23	1078,0	12	592,9
	10	472,4			1038,8	10	566,4

Таблица 4. Параметры деформационного упрочнения при многократном волочении низкоуглеродистой стали

Марка стали, диаметр заготовки	Исходное структурное состояние	Временное сопротивление разрыву исходной заготовки, Н/мм ²	Скорость деформационного упрочнения d_{σ_s}/d Iпц	
			область суммарных обжатий, Iпц	
			(0,57–0,75)–2,15	2,15–3,65
			A ₂	A ₃
Катанка 6,5мм, Ст0М C=0,09% Si = 0,06% Mn = 0,25% P = 0,009% S = 0,026% Cu = 0,06% Cr = 0,03% Ni = 0,08%	После ускоренного охлаждения с прокатного нагрева	343,0	18	16
	Горячекатаное	318,5	17	13
	После отжига в печи с роликовым подом	298,9	14	13
Проволока 2,5 мм, Ст0М	После отжига в печи с конденсационным нагревом	403,8	20	–
	После отжига в протяжных печах	373,4	18	–
	После отжига в колпаковых печах	303,8	17	–

Эксперименты проводили при семикратном волочении с суммарным обжатием $\ln\mu = 1,83$ термообработанной в колпаковой печи исходной заготовки диаметром 2,5 мм из стали Ст0 со следующими свойствами:

Размер зерна феррита, балл	Предел текучести, Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²
7	240	353
8–9	291	370

Выполненный металлографический анализ феррито-перлитной структуры выявил следующие основные особенности структурных изменений.

Начиная с суммарного обжатия 18–35% ($\ln\mu = 0,20–0,43$) зерна феррита и перлита вытягиваются вдоль оси проволоки.

При снижении размера зерна феррита преимущественная ориентация структурных составляющих вдоль оси проволоки отмечается в области меньших суммарных обжатий: балл 8–9 – полная ориентация при $Q_{\text{сум}} = 65,4$ ($\ln\mu = 1,06$); балл 7 – полная ориентация при $Q_{\text{сум}} = 75,4$ ($\ln\mu = 1,40$).

Полученное для мелкозернистой стали снижение суммарного обжатия формирования преимущественной ориентации структурных составляющих вдоль оси проволоки в сочетании с предварительным ускорением окончания области параболического упрочнения, повышая структурную равномерность пластической деформации, должны способствовать более раннему началу и последующему интенсивному уменьшению размеров ячеек по сравнению с крупнозернистой сталью.

В работе [1] переход от волочения железа к низкоуглеродистой стали сопровождается дополнительными субструктурными изменениями, влияющими на параметры деформационного упрочнения. Повышение прочности низкоуглеродистой стали и применение реальных скоростей при непрерывной многократной деформации вызывают рост температуры волочения и усиление блокировки дислокаций атомами внедрения при развитии процессов деформационного старения, что обеспечивает увеличение плотности дислокаций внутри ячеек в феррите, причем в большей степени для мелкозернистой стали.

Таким образом, можно считать, что повышение для мелкозернистой стали скорости деформационного упрочнения в области больших пластических деформаций обусловлено более существенным субструктурным упрочнением и дополнительным упрочнением по типу леса дислокаций.

Приведенные в табл. 4 экспериментальные данные свидетельствуют также, что в третьей области со сверхбольшими суммарными обжатиями наблюдается уменьшение скорости деформационного упрочнения независимо от исходного структурного состояния катанки. Полученные результаты подтверждают выводы работы [1] о влиянии развития процессов динамического возврата на изменение расстояния между субструктурными барьерами, определяющего параметры деформационного упрочнения. Перестройка дислокационной структуры при динамическом возврате, в том числе уменьшение толщины стенок ячеек при аннигиляции дислокаций [3], обеспечивает увеличение длины свободного пробега дислокаций и соответственно снижение скорости деформационного упрочнения в области сверхбольших суммарных обжатий.

Применительно к низкоуглеродистой стали ускоренное охлаждение катанки с прокатного нагрева, уменьшая потери металла в окалину, вызывает при многократном волочении снижение суммарного обжатия до промежуточной термообработки. При этом основными причинами снижения деформируемости являются структурные изменения и повышение напряжения волочения с увеличением прочностных свойств, что в сочетании с уменьшением прироста прочности при единичных обжатиях в области деформаций с затухающим упрочнением негативно сказывается на величине коэффициента запаса прочности.

Одним из технологических приемов повышения прироста прочности за переход в области суммарной деформации с пониженной скоростью деформационного упрочнения является предварительное разупрочнение проволоки с помощью дополнительной деформации с малыми степенями волочением или знакопеременным изгибом с растяжением (ЗПИР) [8]. Проведенные при многократном волочении катанки из стали Ст1кп исследования показали, что разупрочнение проволоки после дополнительной деформации с малыми степенями зависит от предварительного суммарного обжатия и вида дополнительной деформации. До суммарного обжатия 24% наблюдается прирост временного сопротивления разрыву для дополнительной деформации волочением и ЗПИР, а начало атермического (деформационного) разупрочнения начинает проявляться при предварительном суммарном обжатии в 63,5% для ЗПИР и в 82,8% для дополнительной деформации волочением. Причем степень разупрочнения более существенна для деформации знакопеременным изгибом с растяжением.

В табл. 5 приведены результаты волочения катанки из стали Ст1кп на последних переходах в маршруте волочения. Применение дополнительной деформации ЗПИР позволяет повысить показатель относительного прироста прочности проволоки $Y_{\sigma_i} = (\sigma_{\text{в}i+1} - \sigma_{\text{в}i}) / \sigma_{\text{в}i}$ ($\sigma_{\text{в}i}$ и $\sigma_{\text{в}i+1}$ – временное сопротивление проволоки при предыдущем и последующем переходе в маршруте волочения), являющимся одним из критериев деформируемости при волочении [9], в 4,8 раза с 0,025 до 0,12 при увеличении общего суммарного деформирования с 93,8 до 94,5 %.

Таблица 5. Параметры деформирования катанки диаметром 6,61 мм из стали Ст1кп с временным сопротивлением разрыву 360,6 Н/мм²

Суммарное обжатие при предварительном волочении, % (лц)	Временное сопротивление разрыву проволоки при предварительном волочении, Н/мм ²	Показатель Y_{σ_i} по переходам предварительного волочения	Степень единичной дополнительной деформации ЗПИР, %	Изменение временного сопротивления разрыву после дополнительной деформации, Н/мм ²	Степень деформации при последующем волочении, %	Показатель Y_{σ_i} при последующем волочении	Суммарная степень деформирования проволоки, % (лц)
91,0 (2,41)	892,9	0,034	6,0	- 85,3	30,5	0,10	94,2 (2,85)
			11,0	-71,5	30,5	0,12	94,5 (2,90)
93,8 (2,78)	915,2	0,025	–	–	–	–	93,8 (2,78)

Эксперименты показали [8], что деформация знакопеременным изгибом с растяжением при уменьшении диаметра проволоки может сопровождаться обрывностью в местах сварки проволоки в зависимости от ее предшествующего выполнения в маршруте волочения. Поэтому с технологической точки зрения дополнительную деформацию целесообразнее осуществлять совмещенным деформированием волочением и ЗПИР. Несмотря на некоторое уменьшение показателя Y_{σ_i} , совмещенное деформирование позволяет устранить возможную обрывность проволоки в местах сварки даже при предварительном обжатии в волоке на величину 3,0–5,0 %.

Выводы

1. Деформационное упрочнение при многократном волочении низкоуглеродистой проволоки с большими степенями деформации характеризуется наличием трех областей обжатий: в начальной стадии упрочнение обусловлено взаимодействием движущихся дислокаций с лесом дислокаций, а в областях больших и сверхбольших суммарных обжатий – в основном субструктурным упрочнением.
2. Влияние размера зерна феррита на параметры деформационного упрочнения различное: в области параболического упрочнения мелкое зерно снижает склонность к упрочнению, а при субструктурном – усиливает.
3. Переход при многократном волочении от больших к сверхбольшим суммарным обжатиям сопровождается снижением скорости деформационного упрочнения, что обусловлено развитием при пластической деформации процессов динамического возврата.
4. Для повышения деформируемости и суммарного обжатия до промежуточной термической обработки целесообразно осуществлять на последних переходах многократного волочения низкоуглеродистой катанки чередование процессов волочения и совмещенного деформирования с малыми степенями волочением и знакопеременным изгибом с растяжением, используя волочильные блоки стана петлевого типа по Евразийскому патенту 006670 с дополнительной установкой волокодержателя перед устройством для деформации ЗПИР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Langford G., Cohen M. Strain hardening of iron by severe plastic deformation // Trans. Amer. Soc. Met. 1969. Vol. 62. No 3. P. 623–638.
2. Embury J., Keh A., Fisher R. Substructural Strengthening in Materials Subject to Large Plastic Strains // Trans. Met. Soc. AIME. 1966. Vol. 236. No 9. P. 1252–1260.
3. Aernoudt E. Materials Response to Wiredrawing // Wire Journal. 1989. Vol. 22. No 3. P. 53, 55–56, 59–60, 62, 65, 69, 75.
4. Боязитов, М. И. Влияние величины зерна на высоту 40°-ного максимума внутреннего трения / М. И. Боязитов, Ю. В. Пигузов // ФММ. 1965. Вып.4. Т. 20. С. 632–634.
5. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. М.: Мир, 1967. 643 с.
6. Соколов, Л. Д. Механические свойства редких металлов / Л. Д. Соколов, В. А. Скуднов, В. М. Соленов, А. Н. Гладких и др. М.: Металлургия, 1972. 288 с.
7. Вишняков, Я. Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов / Я. Д. Вишняков. М.: Металлургия, 1975. 480 с.

8. Фетисов, В.П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В.П. Фетисов. М.: Мир, 2005. 200 с.
9. Фетисов, В.П. Контроль способности к волочению катанки из углеродистой стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 61–64.

REFERENCES

1. Langford G., Cohen M. Strain hardening of iron by severe plastic deformation. *Trans. Amer. Soc. Met.*, 1969, vol. 62, no. 3, pp. 623–638.
2. Embury J., Keh A., Fisher R. Substructural Strengthening in Materials Subject to Large Plastic Strains. *Trans. Met. Soc. AIME*, 1966, vol. 236, no. 9, pp. 1252–1260.
3. Aernoudt E. Materials Response to Wiredrawing. *Wire Journal*, 1989, vol. 22, no. 3, pp. 53, 55–56, 59–60, 62, 65, 69, 75.
4. Bojazitov M.I., Piguzov Ju. V. Vlijanie velichiny zerna na vysotu 40°-nogo maksimuma vnutrennego trenija [Influence of the grain size on the height of the 40° maximum of internal friction]. *FMM = FMM*, 1965, vyp.4, vol. 20, pp. 632–634.
5. Fridel' Zh. *Dislokacii* [Locations]. Moscow, Mir Publ., 1967, 643 p.
6. Sokolov L.D., Skudnov V.A., Soljonov V.M., Gladkih A.N. et al. *Mehanicheskie svojstva redkih metallov* [Mechanical properties of rare metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 288 p.
7. Vishnjakov Ja. D. *Sovremennye metody issledovanija struktury deformirovannyh kristallov* [Modern methods for studying the structure of deformed crystals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1975, 480 p.
8. Fetisov V.P. *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Work hardening of carbon steel]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
9. Fetisov V.P. Kontrol' sposobnosti k volocheniju katanki iz uglerodistoj stali [Controlling the drawability of carbon steel wire rod]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 61–64.