



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-64-67>  
УДК 669

Поступила 24.09.2024  
Received 24.09.2024

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Россия. E-mail: [olga1560@yandex.ru](mailto:olga1560@yandex.ru)

*Рассмотрено влияние схемы деформации при равномерном и сосредоточенном растяжении, сжатии и волочении на интенсивность деформационного упрочнения низкоуглеродистой стали с различной дисперсностью структуры. С увеличением размера зерна феррита склонность к упрочнению повышается для всех схем деформации. Сжатие снижает структурную чувствительность интенсивности деформационного упрочнения. Равномерное растяжение усиливает интенсивность упрочнения по сравнению с волочением и сосредоточенным растяжением, но уступает одноосному сжатию. Прорыв дислокационными скоплениями подповерхностных слоев проволоки более прочного, сформированного в процессе волочения, поверхностного слоя сопровождается повышением плотности подвижных дислокаций и снижением интенсивности деформационного упрочнения.*

**Ключевые слова.** Интенсивность деформационного упрочнения, дисперсность структуры, одноосное напряжение при сжатии и равномерном растяжении, объемное напряженное состояние при волочении и сосредоточенном растяжении.

**Для цитирования.** Фетисов, В. П. Исследование интенсивности деформационного упрочнения низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 64–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-64-67>.

## INVESTIGATION OF THE INTENSITY OF STRAIN HARDENING OF LOW-CARBON STEEL

V. P. FETISOV, Orel city, Russia. E-mail: [olga1560@yandex.ru](mailto:olga1560@yandex.ru)

*The influence of the deformation scheme under uniform and concentrated tension, compression and drawing on the intensity of strain hardening of low-carbon steel with different dispersion of the structure is considered. With an increase in the grain size of ferrite, the tendency to hardening increases for all deformation schemes. Compression reduces the structural sensitivity of the intensity of strain hardening. Uniform tension enhances the intensity of hardening compared to drawing and concentrated tension, but is inferior to uniaxial compression. The breakthrough of dislocation accumulations through the subsurface layers of the wire of the stronger surface layer formed during drawing is accompanied by an increase in the density of mobile dislocations and a decrease in the intensity of strain hardening.*

**Keywords.** Intensity of strain hardening, dispersion of structure, uniaxial stress under compression and uniform tension, triaxial stress state under drawing and concentrated tension.

**For citation.** Fetisov V. P. Investigation of the intensity of strain hardening of low-carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 4, pp. 64–67. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-64-67>.

Деформируемость низкоуглеродистой катанки [1] и пластические свойства холоднодеформированной проволоки [2] во многом предопределяются величиной интенсивности деформационного упрочнения. Поэтому дополнительные исследования зависимости интенсивности деформационного упрочнения от дисперсности структуры и условий пластической деформации могут способствовать совершенствованию технологических процессов волочения проволоки.

В настоящей статье рассмотрено влияние размера зерна феррита и схемы деформации на интенсивность упрочнения низкоуглеродистой стали.

Объектами исследования служили сталь 15кп с различной дисперсностью исходной структуры (табл. 1) и катанка СтОм (С= 0,11 %): горячекатаная с размером зерна феррита 5–6-й балл и ускоренно охлажденная (7-й балл) с прокатного нагрева (табл. 2). При растяжении рассматривали области равномерной деформации (одноосное напряжение) и сосредоточенной деформации при формировании шейки, в которой материал переходит к трехосному напряженному состоянию при комбинации растягивающих и сдвиговых напряжений [3]. Влияние сжимающих напряжений представлено при одноосном сжатии и в схеме объемного напряженного состояния при деформации волочением. В качестве

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита на механические свойства и интенсивность деформационного упрочнения стали 15кп при растяжении и сжатии образцов диаметром 6,0 мм со скоростью  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 

| Показатель   | Растяжение |          |          |  | Сжатие   |          |          |  |
|--|------------|----------|----------|--|----------|----------|----------|--|
|  | 0,016 мм   | 0,022 мм | 0,042 мм | отношение экстремальных значений $i_p$ | 0,016 мм | 0,022 мм | 0,042 мм | отношение экстремальных значений $i_c$ |
| $\sigma_T, \text{ Н/мм}^2$   | 308,7      | 255,8    | 202,9    | 1,52                                   | 304,8    | 249,9    | 192,1    | 1,59                                   |
| $\sigma_{\text{равн}}, \text{ Н/мм}^2$   | 558,7      | 503,7    | 488,9    | 1,14                                   | -        | -        | -        | -                                      |
| $\sigma_{\text{разр}}, \text{ Н/мм}^2$   | 916,3      | 908,95   | 894,35   | 1,02                                   | -        | -        | -        | -                                      |
| $\sigma_{0,05}, \text{ Н/мм}^2$  | 432,2      | 386,3    | 344,9    | 1,25                                   | 524,3    | 449,8    | 393,8    | 1,33                                   |
| $Y\sigma_{\text{равн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_T) / \sigma_T$                         | 0,81       | 0,97     | 1,41     | 1,74                                   | -        | -        | -        | -                                      |
| $Y\sigma_{\text{разр}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}}) / \sigma_{\text{равн}}$ | 0,79       | 0,80     | 0,83     | 1,05                                   | -        | -        | -        | -                                      |
| $Y\sigma_{0,05} = (\sigma_{0,05} - \sigma_T) / \sigma_T$                                       | 0,40       | 0,51     | 0,70     | 1,75                                   | 0,72     | 0,80     | 1,05     | 1,46                                   |
| $\Psi_{\text{равн}}, \%$   | 19         | 19       | 22       | 1,16                                   | -        | -        | -        | -                                      |
| $\Psi_{\text{полн}}, \%$   | 69         | 69       | 68       | 1,01                                   | -        | -        | -        | -                                      |

Таблица 2. Влияние однократного волочения катанки СтОм на интенсивность деформационного упрочнения проволоки диаметром 5,8 мм

| Характеристика катанки        |       | Параметры однократного волочения и упрочнения проволоки |              |
|-------------------------------|-------|---|--------------|
| Размер зерна феррита, балл    | 7     | Степень деформации $q, \%$                              | 20,4         |
|                               | 5–6   |   | 18,6         |
| $\sigma_{B0}, \text{ Н/мм}^2$ | 362,6 | $\sigma_{B1}, \text{ Н/мм}^2$                           | 456,7        |
|                               | 303,8 |   | 388,1        |
|                               |       | $Y\sigma_B = (\sigma_{B1} - \sigma_{B0}) / \sigma_{B0}$ | 0,26<br>0,28 |

параметра интенсивности деформационного упрочнения использовали относительный прирост прочности, обладающий повышенной структурной чувствительностью по сравнению со скоростью деформационного упрочнения [4] и с показателем степени деформационного упрочнения в известном выражении  $\sigma = K_e^n$  [1].

В работе [5] исследована дислокационная структура при деформации равномерным растяжением, кручением (чистый сдвиг) и прокаткой (сжимающие напряжения) армко-железа со степенями до  $\varepsilon = 0,25$ . Наибольшая плотность дислокаций отмечена для равномерного растяжения, а минимальное значение – для прокатки.

Сосредоточенное растяжение связано с зарождением несплошностей, их ростом и объединением, образованием трещины и ее продвижением до момента окончательного разрушения [3]. При этом образовавшаяся в месте шейки субструктура характеризуется высокой плотностью дислокаций в форме ячеек со слабыми следами более эффективных для упрочнения исходных высокоугловых границ [6].

При исследовании [7] степени измельчения областей когерентного рассеяния и общего уровня истинных напряжений при низкотемпературной ( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ) деформации армко-железа установлено превышение плотности дислокаций для одноосного сжатия по сравнению соответственно с равномерным растяжением и кручением, что согласуется с непосредственным контролем плотности дислокаций для растяжения и кручения армко-железа после деформирования при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  [5]. Отмеченное влияние схем и температур деформации позволяют считать рост плотности дислокаций при переходе от растяжения к сжатию и для комнатной температуры испытания.

Начальная стадия волочения низкоуглеродистой стали сопровождается образованием дислокационной структуры, состоящей преимущественно из плотных клубков дислокаций. Природа упрочнения в этой области обусловлена механизмом пересечения дислокаций, обеспечивающим повышенную интенсивность деформационного упрочнения по сравнению с последующим субструктурным упрочнением при формировании ячеистой структуры [8] в виде ячеек, разделенных друг от друга главным образом малоугловыми границами с меньшим их влиянием на степень упрочнения [6].

Экспериментальные данные (табл. 1) свидетельствуют, что сжатие по величине предела текучести уступает растяжению, а вклад повышенной плотности дислокаций при сжатии в превышение растягивающих напряжений начинает проявляться со степени деформации  $\varepsilon = 0,02$  [9] и для  $\varepsilon = 0,05$  становится

очевидным: прирост  $\sigma_{0,05}$  составляет в 1,18 раза. При этом уменьшение количества перлита в стали с  $C = 0,09\%$  снижает упрочняющий эффект сжимающего напряжения и повышает критическую степень деформации с  $\varepsilon = 0,02$  до  $\varepsilon = 0,1$  [10].

Характерной особенностью деформирования крупнозернистой стали на стадии однородной деформации растяжением является повышение доли внутризеренной деформации, что наряду с усилением блокировки дислокаций атомами внедрения при увеличении размера зерна феррита [11] обеспечивает снижение плотности подвижных дислокаций при взаимодействии движущихся дислокаций с лесом дислокаций и рост показателя интенсивности деформационного упрочнения  $Y\sigma_{\text{равн}}$  при уменьшении дисперсности структуры с 0,81 до 1,41 (табл. 1).

В пределах равномерного растяжения повышение степени деформации с  $\varepsilon = 0,05$  до  $\varepsilon_{\psi} = 0,21-0,25$  ( $\Psi_{\text{равн}}, \% = 19-22$ ) практически не оказывает влияния на структурную чувствительность показателей  $Y\sigma_{0,05}$  и  $Y\sigma_{\text{равн}}$  ( $i_p = 1,75$  против  $i_p = 1,74$ ). В свою очередь предварительное деформирование и увеличение несплошностей в структуре при сосредоточенном растяжении вызывают снижение общего уровня  $Y\sigma_{\text{разр}}$  относительно показателя  $Y\sigma_{\text{равн}}$ .

Отмеченная специфика деформации сжатием повышает также по сравнению с растяжением склонность к упрочнению низкоуглеродистой стали: рост показателей  $Y\sigma_{0,05}$  для исследованной дисперсности структуры составляет в 1,6 раза, но одновременно уменьшает зависимость  $Y\sigma_{0,05}$  от размера зерна феррита с  $i_p = 1,75$  до  $i_c = 1,46$  (табл. 1).

Для сопоставимых с равномерным растяжением условий по дисперсности структуры и степени деформации рассмотрим далее влияние объемного напряженного состояния при волочении на параметры интенсивности деформационного упрочнения. Обжатие при волочении составляло  $q, \% = (18,6-20,4)$ , а однородная деформация при растяжении  $\Psi_{\text{равн}}, \% = (19-22)$ . Исследования показали (табл. 2), что для волочения сохраняется отмеченное ранее для растяжения и сжатия повышение интенсивности упрочнения с ростом размера зерна феррита. Вместе с тем совместное влияние при волочении сжимающих и растягивающих напряжений сопровождается снижением в 4,4 раза интенсивности деформационного упрочнения по сравнению с растяжением:  $Y\sigma_{\psi} = (0,26-0,28)$  против  $Y\sigma_{\text{равн}} = (0,97-1,41)$ . Такое существенное снижение склонности к упрочнению связано с влиянием для схем объемного напряженного состояния не только микроскопических, но и макроскопических условий пластической деформации.

Процесс одноосного растяжения характеризуется однородным распределением деформации по сечению и дислокаций в микрообъемах [12]. При этом большинство дислокаций имеют винтовую ориентацию [13], которые по сравнению с краевыми дислокациями имеют меньшее взаимодействие с атомами внедрения [14]. Ослабление степени закрепления дислокаций атомами внедрения снижает дополнительное упрочнение, являющимся источником локализации пластической деформации [9], и способствует общему повышению равномерности деформации при растяжении.

В отличие от равномерного растяжения при волочении наблюдается неоднородная деформация по сечению металла: концентрация в поверхностных слоях, а внутренние слои в зависимости от степени единичной деформации могут вообще оставаться упругодеформированными. Следствием неравномерной деформации и превышения прочности поверхностных слоев являются уменьшение (табл. 1, 2) при волочении прироста прочности с  $\Delta\sigma_{\text{равн}} = (247,9-286,0)$  до  $\Delta\sigma_{\text{Bi}} = (84,3-94,1)$  Н/мм<sup>2</sup> и соответственно интенсивности деформационного упрочнения.

Выполненный по переходам многократного волочения катанки СтОм [15] контроль упрочнения и изменений твердости по сечению проволоки показал, что формирование при деформации положительного градиента твердости по сечению также сопровождается снижением склонности к упрочнению и после больших суммарных обжатий. При этом природа деформационного разупрочнения на всех стадиях многократного волочения обусловлена прорывом при испытаниях на растяжение более прочного поверхностного слоя дислокационными скоплениями подповерхностных слоев проволоки и повышением плотности подвижных дислокаций.

### Выводы

1. Повышение размера зерна феррита обеспечивает рост интенсивности деформационного упрочнения независимо от схемы деформации.
2. Деформация сжатием уменьшает влияние размера зерна на изменение интенсивности упрочнения.
3. Для сопоставимых условий деформирования равномерное растяжение превышает интенсивность упрочнения при волочении, но уступает сжатию.

4. Более прочный поверхностный слой проволоки служит барьером для дислокационных скоплений подповерхностных слоев, прорыв которого при растяжении сопровождается увеличением плотности подвижных дислокаций и снижением интенсивности деформационного упрочнения.

5. Предварительное деформирование и усиление несплошности структуры вызывают уменьшение интенсивности упрочнения при сосредоточенном растяжении.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Фетисов, В. П.** Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. – М.: Мир, 2005. – 200 с.
2. **Фетисов, В. П.** Влияние диспергирования структуры при многократном волочении на пластичность низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2024. – № 2. – С. 54–56.
3. **Вигли, Д. А.** Механические свойства материалов при низких температурах / Д. А. Вигли. – М.: Мир, 1974. – 374 с.
4. **Фетисов, В. П.** Влияние дисперсности структуры на интенсивность упрочнения при растяжении перлитной стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2024. – № 3. – С. 35–36.
5. **Precht, W.** / W. Precht // Bulletin de L'Académie polonaise des sciences. – 1966. – Vol. XIV. – № 2.
6. **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.
7. **Северденко, В. П.** Об изменении характеристик прочности и размера блоков мозаики армо-железа при низких температурах / В. П. Северденко, М. И. Калачев, Е. С. Севастьянов // Пластическая деформация и обработка металлов давлением: сб. – Минск: Наука и техника, 1969. – С. 58–62.
8. **Фетисов, В. П.** Структурные аспекты деформационного упрочнения при многократном волочении низкоуглеродистой проволоки / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 44–49.
9. **Фетисов, В. П.** Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. – Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996. – 120 с.
10. **Morrison, W. B.** The effect of grain size on the stress-strain relationship in low-carbon steel / W. B. Morrison // Trans. ASM. – 1966. – Vol. 59. – P. 824–845.
11. **Фетисов, В. П.** Локализация пластической деформации при деформировании низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 51–54.
12. **Бабич, В. К.** Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
13. **Precht, W.** / W. Precht // Electron Microscopy. – 1966. – Vol. 1. – P. 645.
14. **Фридель, Ж.** Дислокации / Ж. Фридель. – М.: Мир, 1967. – 643 с.
15. **Фетисов, В. П.** Технологические требования к волочильному оборудованию для производства проволоки из углеродистой стали / В. П. Фетисов // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 64–68.

### REFERENCES

1. **Fetisov V. P.** *Deformacionnoe uprochnenie uglevodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
2. **Fetisov V. P.** Vlijanie dispergirovanija struktury pri mnogokratnom volochenii na plastichnost' nizkouglerodistoj stali [The influence of dispersing structure in multiple drawing on the plasticity of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 2, pp. 54–56.
3. **Wigley D. A.** *Mekhanicheskie svojstva materialov pri nizkih temperaturah* [Mechanical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mir Publ., 1974, 374 p.
4. **Fetisov V. P.** Vlijanie dispersnosti struktury na intensivnost' uprochnenija pri rastjazhenii perlitnoj stali [The influence of structure dispersity on the intensity of hardening during tensile testing of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 3, pp. 35–36.
5. **Precht W.** Bulletin de L'Académie polonaise des sciences, 1966, vol. XIV, no. 2.
6. **Morrison W. B., Miller R. L.** Plastichnost' spлавov so sverhmelkim zernom [Plasticity of alloys with ultra-fine grains]. *Sverhmelkoe zerno v metallah = Ultrafine grain in metals*. Moscow, Metallurgija Publ., 1973, pp. 181–205.
7. **Severdenko V. P., Kalachev M. I., Sevastyanov E. S.** Ob izmenenii harakteristik prochnosti i razmera blokov mozaiki armko-zheleza pri nizkih temperaturah [On the change in the strength characteristics and size of armco-iron mosaic blocks at low temperatures]. *Plasticheskaya deformacija i obrabotka metallov davleniem = Plastic deformation and metal forming*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969, pp. 58–62.
8. **Fetisov V. P.** Strukturnye aspekty deformacionnogo uprochnenija pri mnogokratnom volochenii nizkouglerodistoj provoloki [Structural aspects of deformation hardening with repeated drawing low carbon wire]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 44–49.
9. **Fetisov V. P.** *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Deformational aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
10. **Morrison W. B.** The effect of grain size on the stress-strain relationship in low-carbon steel. *Trans. ASM*, 1966, vol. 59, pp. 824–845.
11. **Fetisov V. P.** Lokalizacija plasticheskoj deformacii pri deformirovanii nizkouglerodistoj stali [Localization of plastic deformation during deformation of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 51–54.
12. **Babich V. K., Gul' Yu. P., Dolzhenkov I. E.** *Deformacionnoe starenie stali* [Deformation aging of steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 320 p.
13. **Precht W.** Electron Microscopy, 1966, vol. 1, 645 p.
14. **Fridel' Zh.** *Dislokacii* [Dislocations]. Moscow, Mir Publ., 1967, 643 p.
15. **Fetisov V. P.** Tehnologicheskie trebovanija k volochil'nomu oborudovaniju dlja proizvodstva provoloki iz uglevodistoj stali [Technological requirements for drawing equipment for the production of carbon steel wire]. *Stal' = Steel*, 2008, no. 9, pp. 64–68.