

УДК 669.017:669.141.24:669.14.018.27

## ВПЛИВ КРИСТАЛОГРАФІЇ ТА ДИСПЕРСНОСТІ ПЛАСТИНЧАСТОГО ПЕРЛІТУ В КАТАНЦІ НА СТРУКТУРУ Й ВЛАСТИВОСТІ ДРОТУ

ПАРУСОВ Е. В.<sup>1</sup>, *к.т.н., с.н.с.*,  
ПАРУСОВ В. В.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
СУХОМЛИН Г. Д.<sup>2</sup>, *д.т.н., проф.*,  
САГУРА Л. В.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
ЧУЙКО І. М.<sup>3\*</sup>, *к.т.н.*

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, м. Дніпропетровськ, Україна

<sup>2</sup> ДВНЗ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, м. Дніпропетровськ, Україна

<sup>3\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, м. Дніпропетровськ, Україна, +38 056 776 82 28, e-mail: ichuyko@mail.ru

Сталі перлітного класу являють собою природний композит, що складається на мікроструктурному рівні з пластин цементиту й фериту, сполучені решітками яких мають орієнтаційні зв'язки як з вихідним аустенітом, так і між собою. Основним видом сполучення між решітками цементиту й фериту в перліті є співвідношення Ісайчева:  $(\overline{103})\alpha \parallel (110)\gamma$  і  $(010)\alpha \parallel (1\overline{1}\overline{1})\gamma$ , що призводить до утворення решітки співпадаючих вузлів і, як наслідок, – низькоенергетичних міжфазних границь типу  $\Sigma 13$ . Підвищення дисперсності перліту призводить до підвищення питомої площі міжфазних границь між цементитом і феритом, внаслідок чого зростає кількість спеціальних границь, знижується товщина пластин цементиту та підвищується деформованість при волочінні вуглецевої сталі. При холодній деформації шляхом волочіння відбуваються процеси деформаційного змінення катанки-дроту з вуглецевої сталі та переорієнтація перлітних колоній до осі волочіння на кут, який залежить від ступеня деформації. Безперервне підвищення міцності та падіння пластичних властивостей (відносного звуження, числа перегинів і скручувань) при волочінні патентованою високовуглецевої сталі зі ступенями деформації більше 78 % пояснюється частковою деструкцією пластин цементиту, що приводить до блокування вуглецем дислокацій в феритних пластинах.

**Ключові слова:** вуглецева сталь; катанка-дріт; перліт; спеціальні границі; деформованість; механічні властивості

## ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИИ И ДИСПЕРСНОСТИ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА В КАТАНКЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ

ПАРУСОВ Э. В.<sup>1</sup>, *к.т.н., с.н.с.*,  
ПАРУСОВ В. В.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
СУХОМЛИН Г. Д.<sup>2</sup>, *д.т.н., проф.*,  
САГУРА Л. В.<sup>1</sup>, *к.т.н.*,  
ЧУЙКО И. Н.<sup>3\*</sup>, *к.т.н.*

<sup>1</sup> Інститут черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup> ГВУЗ Приднeпровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, г. Днепропетровск, Украина

<sup>3\*</sup> Інститут черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепропетровск, Украина, +38 056 776 82 28, e-mail: ichuyko@mail.ru

Стали перлитного класса представляют собой естественный композит, состоящий на микроструктурном уровне из пластин цементита и феррита, сопряженные решетки которых имеют ориентационные связи как с исходным аустенитом, так и между собой. Основным видом сопряжения между решетками цементита и феррита в перлите является соотношение Исайчева:  $(\overline{103})\alpha \parallel (110)\gamma$  и  $(010)\alpha \parallel (1\overline{1}\overline{1})\gamma$ , что приводит к образованию решеток совпадающих узлов и, как следствие, – низкоэнергетических межфазных границ типа  $\Sigma 13$ . Повышение дисперсности перлита приводит к повышению удельной площади межфазных границ между цементитом и ферритом, вследствие чего возрастает количество специальных границ, снижается толщина пластин цементита и повышается деформируемость при волочении углеродистой стали. При холодной деформации путем волочения происходят процессы деформационного упрочнения катанки-проволоки из углеродистой стали и переориентация перлитных колоний к оси волочения на угол, зависящий от степени деформации. Непрерывное

повышение прочностных и падение пластических свойств (относительного сужения, числа перегибов и скручиваний) при волочении патентированной высокоуглеродистой стали со степенями деформации более 78 % объясняется частичной деструкцией пластин цементита, приводящей к блокированию углеродом дислокаций в ферритных пластинах.

**Ключевые слова:** углеродистая сталь; катанка-проволока; перлит; специальные границы; деформируемость; механические свойства

## EFFECTS OF CRYSTALLOGRAPHY AND DISPERSIBILITY OF PLATE PEARLITE IN WIRE ROD TO THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WIRE

PARUSOV E. V., *Cand. of Tech Sci., Senior Researcher,*

PARUSOV V. V., *Dr. of Tech. Sci., Prof,*

SUKHOMLIN G. D., *Dr. of Tech. Sci., Prof,*

SAHURA L. V., *Cand. of Tech Sci.,*

CHUYKO I. N., *Cand. of Tech Sci.*

<sup>1</sup> Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine

<sup>2</sup> SIHE Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chemishevskogo str., 24-a, Dnipropetrovsk, Ukraine

<sup>3\*</sup> Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine, +38 056 776 82 28, e-mail: ichuyko@mail.ru

Steels of pearlitic grade are natural composites which, on their micro-structural levels, consist of cementite and ferrite plates with their conjugated grids having orientation bonds with the both, the austenite and between each other. The major type of cementite and ferrite grids' conjugation is described by the Isaychev's ratio:  $(\bar{1}03)c \parallel (110)f$  and  $(010)c \parallel (1\bar{1}\bar{1})f$ , which results in forming of the coinciding nodes grid, which, therefore, leads to low-power interphase boundaries of  $\Sigma 13$  type. Increasing of perlite's dispersibility results in increasing of the specific area of the interphase boundaries between cementite and ferrite. This, in turn, leads to the number of specific boundaries. The width of cementite plates decreases, and, therefore, the drawing ability of carbon steels is increased. In the course of cold deforming, the mechanical hardening of wire rod made of carbon steel takes place along with re-orienting of pearlite colonies to the axis of drawing at the angle which depends of the deformation degree. Continuous increasing of tensile strength and dropping of plasticity (reduction of cross-section area, number of kinks and twists) in the course of drawing of patented high-carbon steel with its deformation degree over 78 % can be explained by partial destruction of cementite plates resulting in blocking of ferrite plates' dislocations by carbon.

**Key terms:** carbon steel; wire rod; pearlite; specific boundaries; drawing ability; mechanical properties

Стали перлитного класса представляют собой естественный композиционный материал на микроструктурном уровне.

Из анализа многочисленных работ по перлитному превращению в сталях следует, что при непрерывном или изотермическом охлаждении гомогенного аустенита образуется преимущественно пластинчатый перлит. В горячекатаном состоянии и после патентирования перлитные колонии в углеродистых сталях по мнению [1] ориентированы хаотически, хотя в других исследованиях [2, 3] показано, что кристаллические решетки феррита и цементита в каждой колонии имеют строгую ориентационную связь с исходным аустенитом.

Известно, что перлит представляет собой бикристалл [4, 5], т.е. состоит из двух взаимопроникающих кристаллов феррита и цементита. Согласно [6] любая из двух фаз может быть ведущей при распаде аустенита по перлитному механизму. Выделение избыточных фаз (феррита или цементита) способствует кристаллизации пластинчатого перлита. Действие избыточного цементита проявляется непосредственно, поскольку

он представляет собой готовые подложки для дальнейшей кристаллизации пластин цементита [7]. В свою очередь, действие избыточного феррита проявляется в пересыщении граничащего с ним аустенита углеродом, что также способствует образованию в указанных объемах аустенита цементитных подложек [8].

Из данных [9] следует, что при снижении температуры перлитного превращения повышается роль граничной диффузии в сравнении с объемной, вследствие чего возрастает вклад диффузии вдоль межфазной поверхности в общем массопереносе атомов внедрения и замещения.

С термодинамической точки зрения изменение свободной энергии при аустенито-перлитном превращении определяется выражением [6]:

$$\Delta F = -\Delta F_{об} + \Delta F_{пов} + \Delta F_{упр},$$

где  $\Delta F_{об}$  – изменение объемной энергии при образовании новых фаз с меньшей свободной энергией по сравнению с исходной фазой;  $\Delta F_{пов}$  – изменение поверхностной энергии при образовании новых фаз;  $\Delta F_{упр}$  – изменение упругой энергии при превращении.

По мнению [10] генезис пластинчатого перлита определяется информацией (плоскополигональной субструктурой), возникающей в аустените при термопластической и дилатационной деформации, происходящей в процессе охлаждения и фазового превращения аустенита.

Согласно [3] взаимная параллельность пластин цементита и феррита в перлите обуславливает единообразную кристаллографическую ориентацию этих фаз в пределах одной колонии перлита, а взаимная ориентация кристаллических решёток феррита и цементита (их ориентационное соотношение) обеспечивает наилучшее сопряжение двух кристаллических решеток по габитусной плоскости пластин. Это способствует снижению межфазной  $\alpha/\theta$  (ф/ц) поверхностной энергии перлита и повышает его термическую устойчивость.

Установлено, что между решётками цементита и феррита реализуются ориентационные соотношения (ОС): Исайчева (ОСИ):  $(\bar{1}03)_{\text{ц}} \parallel (110)_{\text{ф}}$ ,  $(010)_{\text{ц}} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\text{ф}}$ , и Питча (ОСП), при котором  $(001)_{\text{ц}} \parallel (2\bar{1}5)_{\text{ф}}$  [3, 11]. Ориентационное соотношение Багаряцкого (ОСБ) в перлитных структурах не наблюдается [3, 12], поскольку было предложено им в 1952 году в качестве модели механизма перестройки тетрагональной решётки мартенсита в орторомбическую решётку цементита [3, 11].

Соотношение Исайчева, при котором  $(\bar{1}03)_{\text{ц}} \parallel (110)_{\text{ф}}$ ;  $(010)_{\text{ц}} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\text{ф}}$  отличается от ОСБ взаимным поворотом решеток цементита и феррита на  $3,58^\circ$ , вокруг общей оси  $[010]_{\text{ц}} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\text{ф}}$  [3, 11], рис. 1 и 2.

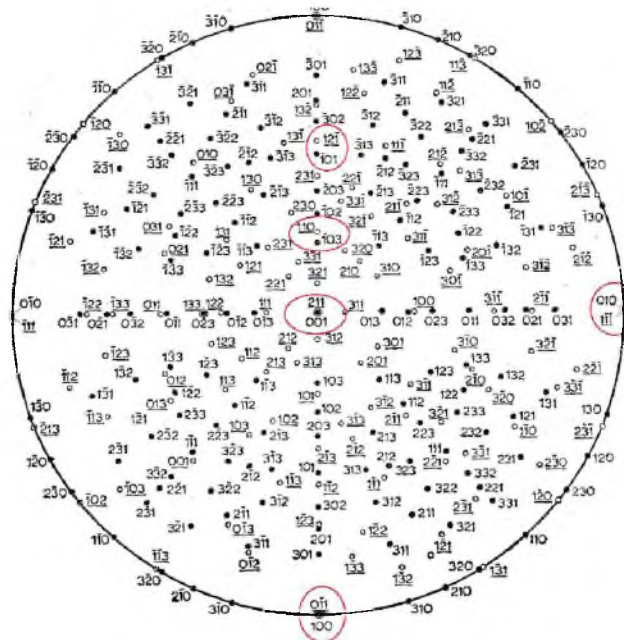


Рис. 1. Стереографическая проекция, представляющая ориентационное соотношение Багаряцкого между ферритом и цементитом. Индексы плоскостей феррита подчёркнуты / Stereographic projection comprises the Bagaryatsky's orientation ratio between ferrite and cementite. Indexes of ferrite planes are underlined

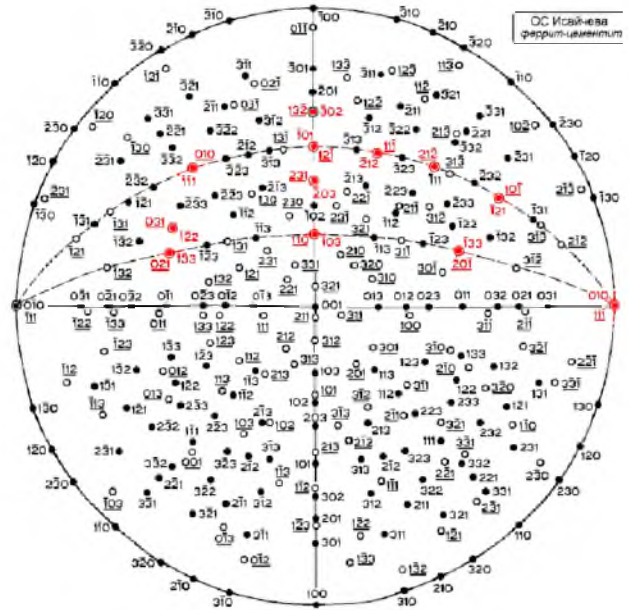


Рис. 2. Стереографическая проекция, представляющая ориентационное соотношение Исайчева между ферритом и цементитом. Индексы плоскостей феррита подчёркнуты / Stereographic projection comprises the Isaychev's orientation ratio between ferrite and cementite. Indexes of ferrite planes are underlined

Из стереопроекции на рис. 1 и 2 можно видеть, что в отличие от ОСБ, при реализации ОСИ совпадают многие плоскости феррита и цементита. На рисунке 2 пунктиром отмечены большие круги, которые принадлежат зонам:

а)  $[1\bar{1}2]_{\text{ф}} \parallel [301]_{\text{ц}}$  – содержит, например, полюса «парных» плоскостей  $(\bar{1}03)_{\text{ц}} \parallel (110)_{\text{ф}}$ ;  $(010)_{\text{ц}} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\text{ф}}$ ;  $(\bar{1}33)_{\text{ц}} \parallel (20\bar{1})_{\text{ф}}$ ;  $(\bar{1}33)_{\text{ц}} \parallel (021)_{\text{ф}}$ ; и др.

б)  $[101]_{\text{ф}} \parallel [101]_{\text{ц}}$  – содержит полюса плоскостей  $(\bar{1}01)_{\text{ц}} \parallel (12\bar{1})_{\text{ф}}$  и  $(010)_{\text{ц}} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\text{ф}}$ , а также другие пары, отмеченные двойными кружками, например,  $(\bar{1}11)_{\text{ц}} \parallel (212)_{\text{ф}}$ ;  $(\bar{1}\bar{1}1)_{\text{ц}} \parallel (010)_{\text{ф}}$ ;  $(121)_{\text{ц}} \parallel (10\bar{1})_{\text{ф}}$ .

Большое количество параллельных плоскостей двух разных фаз означает высокую вероятность образования решетки близких к совпадению узлов (РБСУ), в которой есть плоскости с высокой плотностью общих для двух решёток связей между атомами фаз.

На рисунке 3 графически представлено, как выглядят решётки с осями зон  $[010]_{\text{ц}} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\text{ф}}$ , повернутые вокруг общей оси так, чтобы совпали полюса  $(\bar{1}03)_{\text{ц}} \parallel (110)_{\text{ф}}$ . В результате образуется РБСУ, а её ячейка (выделена пунктиром) имеет обратную плотность совпадающих узлов  $\Sigma = 13$ .

Очевидно, что параметры такой условной РБСУ также являются условными, то есть не строгими с математической точки зрения, однако малые величины разности между скалярными значениями совпадающих векторов, составляющие десятые доли процента, позволяют полагать, что в реальных кристаллах такие узлы действительно совпадают. При этом возникают небольшие растягивающие или

сжимающие напряжения, периодически повторяющиеся вдоль рассматриваемого направления.

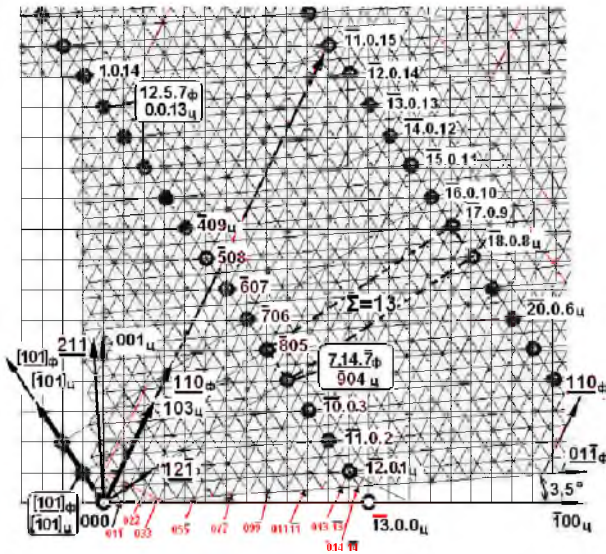


Рис. 3. Жёсткие решётки с осями зон  $[11\bar{1}]_ф$  феррита и  $[010]_ц$  цементита, наложенные друг на друга в соответствии с ОС Исайчева. Параметры решетки феррита увеличены в два раза / Hard grids with zones' axes of  $[11\bar{1}]_ф$  ferrite and  $[010]_ц$  cementite overlaid in conformity with Isaychev's orientation ratio. Parameters of the ferrite grid are increased twofold

Проведенный анализ дебаграмм массивного (7...8 мм) и тонкого (0,1...0,08 мм) образцов стали У8А, запаянных в одну стеклянную ампулу и подвергнутых после аустенитизации при 950 °С охлаждению со средней скоростью 40 °С/ч в интервале температур 950...670 °С показал размытые линии от плоскости (220)<sub>ф</sub>, рис. 4, что является следствием частичного рассогласования параметров сопрягаемых решеток цементита и феррита.

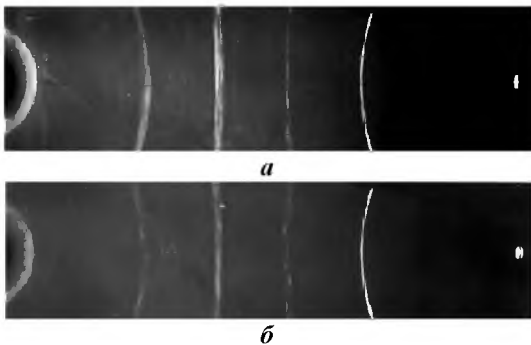


Рис. 4. Дебаграммы массивного (а) и тонкого (б) образцов стали У8А, охлажденных в интервале 950...670 °С со средней скоростью 40 °С/ч / Debye powder diagrams of a massive (a) and thin (b) samples of U8A grade steel cooled in the temperature range between 950...670 °С with average speed of 40 °С/hour

Из дополнительных факторов, влияющих на размытие линии (220)<sub>ф</sub>, можно отметить различие в

коэффициентах линейного расширения пластин цементита и феррита [14].

Атомное строение специальных границ (СГ) отличается от обычных тем, что для двух решеток, повернутых на определенный угол вокруг некоторых кристаллографических осей, возникает третья, общая для них подрешетка, и атомы на границе находятся в узлах этой подрешетки [13, 15]. Поверхностная энергия таких СГ существенно ниже энергии произвольных большеугловых границ.

Межфазные СГ, формирующиеся между пластинами феррита и цементита в перлите, способствуют деформируемости углеродистой стали при волочении. Известно [16], что повышение температуры металла после горячей деформации, при условии, что эта температура превышает температуру рекристаллизации аустенита, приводит к росту зерна и формированию при последующем охлаждении более дисперсного перлита, для которого характерно увеличение удельного количества межфазных СГ и меньшая толщина пластин хрупкого цементита.

При холодной деформации путем волочения происходит деформационное упрочнение катанки-проволоки из углеродистой стали [17], а также ориентация перлитных колоний в ее структуре к оси волочения на угол, зависящий от степени деформации. Это позволяет получить в проволоке для металлокорда номинальным диаметром 0,15 мм временное сопротивление в пределах 2450...3040 Н/мм<sup>2</sup> (ГОСТ 14311-85 «Металлокорд»).

Согласно [1], обжатие на 15 % стали с тонкопластинчатой (сорбитной) структурой вызывает деформацию цементитных пластин, выражающуюся в повороте пластин к оси волочения и начале процесса их дробления. При этом в ферритной матрице происходит измельчение и разворот блоков.

Деформация на 40 % приводит к дальнейшему дроблению и повороту цементитных пластин. Значительную степень локального наклепа ферритных пластин в неблагоприятно ориентированных перлитных колониях подтверждает размытие рефлексов на электронограммах. Таким образом, при волочении в участках с неблагоприятной ориентацией пластин перлита создается субструктура со смешанными дислокационно-межфазными границами, и возникает состояние локального перенаклепа, что может привести к охрупчиванию проволоки.

При деформации со степенью 86 % цементитная фаза перлита имеет вид длинных и тонких пластинок, ориентированных практически вдоль оси волочения, при этом редко можно наблюдать массовое дробление цементитных пластин. Из этого следует, что структура сильно деформированной углеродистой проволоки оказывается более упорядоченной, чем хаотичной. В связи с этим, охрупчивание углеродистой проволоки связано, по видимому, не с массовым, а с локальным перенаклепом, который характерен для

неблагоприятно ориентированных перлитных колоний. В работе [1] отмечено, что величина межпластиночных промежутков, а также толщина цементитных пластин уменьшается пропорционально диаметру проволоки, полученной из исходной заготовки.

Пластическая деформация по-разному влияет на грубо- и тонкопластинчатый перлит. Способность цементита к деформации уменьшается с увеличением толщины пластин. У тонкопластинчатого перлита при деформации уменьшается как толщина цементитных пластин так и межпластиночное расстояние [2].

В работе [18] показано, что на начальных стадиях пластической деформации пластинчатого перлита происходит увеличение плотности дислокаций в ферритных промежутках, особенно вблизи цементитных пластин. Наряду со скольжением между цементитными и ферритными пластинами наблюдается пластическая деформация путем сбросообразования [2, 19]. Чем уже полоса сброса, тем больше трещинообразование в перлите. При пластической деформации перлитной структуры дислокации уносят атомы углерода в виде атмосфер и происходит частичное уменьшение его концентрации в цементите и соответствующее её повышение в ферритной составляющей [2, 20]. Объясняется это тем, что энергия связи углерода с дислокациями превышает энергию связи углерода в цементите.

В работе [11] были определены межпластиночные расстояния в перлите доэвтектоидной стали 36Г2С, а также толщина пластин цементита. С использованием этих данных была рассчитана удельная межфазная поверхность сопряжения пластин цементита и феррита в условной колонии перлита для межпластиночных расстояний 0,10; 0,13 и 0,22 мкм, рис. 5. При этом известная модель цементитного каркаса в доэвтектоидной стали [13], включающая в качестве морфологических составляющих пластины, ленты и стержни, была заменена для эвтектоидной стали на пластинчатую модель Мейла без учета образования цементитных подложек [8].

Из рис. 5 следует, что удельная межфазная поверхность сопряжения цементитных и ферритных пластин возрастает при уменьшении межпластиночного расстояния в перлите. Вследствие этого также возрастает количество СГ между пластинами цементита и феррита, что способствует повышению технологической пластичности углеродистых сталей при волочении и других видах холодной деформации.

Временное сопротивление сорбитизированной стали У8А с увеличением степени деформации монотонно возрастает, причем до деформации 78 % с меньшей интенсивностью, чем при дальнейшем повышении деформации; относительное сужение, достигнув максимума при степени деформации 78 %, начинает уменьшаться при дальнейшем росте

степени деформации; число перегибов повышается с ростом степени деформации до 84 %, а затем уменьшается; количество скручиваний, достигнув максимума при степени деформации 78 %, уменьшается при дальнейшем повышении деформации при волочении.

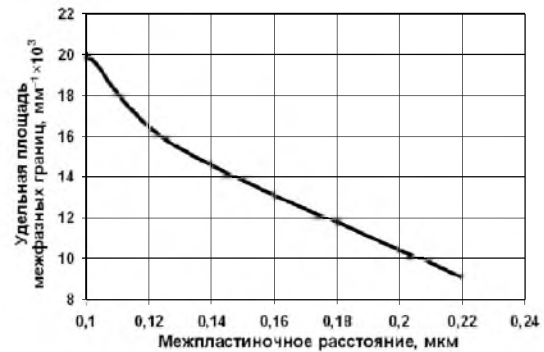


Рис. 5. Зависимость удельной площади межфазной поверхности от межпластиночного расстояния в перлите / Specific area of interphase surface vs. interplate distance in pearlite

Механические свойства патентованной высокоуглеродистой стали У8А со структурой сорбита (межпластиночное расстояние меньше 0,20 мкм по ГОСТ 8233-56) в зависимости от степени деформации при волочении приведены на рис. 6 [21].

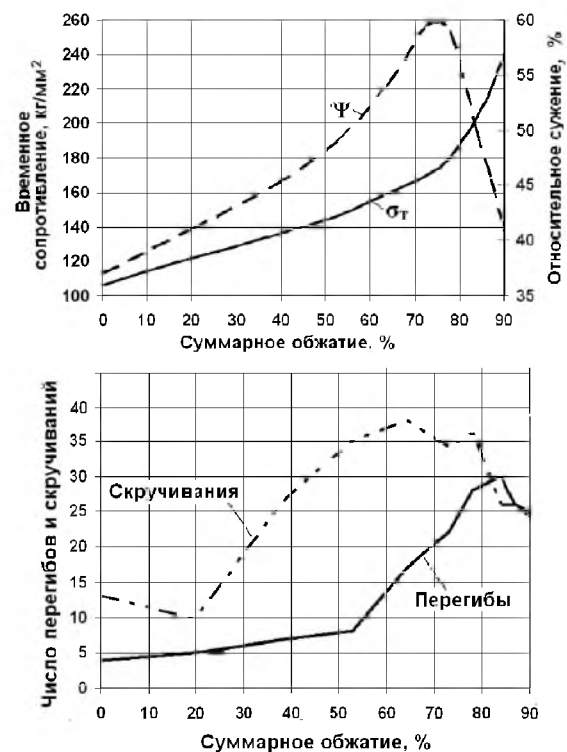


Рис. 6. Влияние исходной структуры и степени деформации при волочении на механические свойства высокоуглеродистой стали У8А / Effect of the initial structure and deformation degree during the process of drawing to the mechanical properties of high-carbon steel of U8A grade

Снижение пластических характеристик при повышении степени деформации более 78 % обусловлено указанным выше растворением цементитных пластин перлита и переходом углерода в дислокации и субграницы ферритных пластин. При этом углерод блокирует дислокации и субграницы, затрудняя движение вновь возникших дислокаций с ростом степени деформации при волочении.

### Выводы

1. Стали перлитного класса представляют собой естественный композит, состоящий на микроструктурном уровне из пластин цементита и феррита, сопряженные решетки которых имеют ориентационные связи как с исходным аустенитом, так и между собой.

При высоких степенях (не менее 78 %) холодной деформации волочением пластины цементита и феррита вытягиваются в направлении оси волочения, а высокоуглеродистая проволока для металлокорда диаметром 0,15 мм приобретает временное сопротивление в пределах 2450...3040 Н/мм<sup>2</sup>.

2. Основным видом сопряжения между решетками цементита и феррита в перлите является соотношение Исайчева: (103)ц || (110)ф и (010)ц || (111)ф, что приводит к образованию решетки

совпадающих узлов и как следствие – низкоэнергетических межфазных границ типа  $\Sigma 13$ .

3. Некоторое несоответствие в расположении атомов железа по сопрягаемым (габитусным) плоскостям цементита и феррита приводит к размытию (уширению) на дебаеграмме линий от плоскости (220)ф даже при весьма медленном охлаждении (около 40 °С/ч) в интервале температур перлитного превращения.

4. Повышение дисперсности перлита приводит к повышению удельной площади межфазных границ между цементитом и ферритом, вследствие чего возрастает количество СГ, снижается толщина пластин цементита и повышается деформируемость при волочении углеродистой стали.

5. Временное сопротивление патентованной стали У8А с повышением степени деформации возрастает, причем до деформации 78 % с меньшей интенсивностью, чем при дальнейшем повышении деформации.

6. Падение относительного сужения, числа перегибов и скручиваний при волочении со степенью деформации ~ 78 % патентованной стали У8А можно объяснить частичной деструкцией пластин цементита, приводящей к блокированию углеродом дислокаций в ферритных пластинах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Гриднев В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – К. : Наукова думка, 1974. – 232 с.

Gridnev V. N. Strength and ductility of cold deformed steel / V. N. Gridnev, V. G. Gavriilyuk, Y. Y. Meshkov. – Kyiv. : Scientific thought, 1974. – 232 p.

2. Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливцев, Д. А. Мирзасев, И. Л. Яковлева [и др.]. Екатеринбург : УрО РАН, 2006. – 311 с.

Pearlite in carbon steels / V. M. Schastlivtsev, D. A. Mirzaev, I. L. Yakovleva [et al.]. Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. – 311 p.

3. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М. : Наука, 1977. – 236 с.

Kurdyumov G. V. Transformation in iron and steel / G. V. Kurdyumov, L. M. Utevskiy, R. I. Entin. – Moscow : Science, 1977. – 236 p.

4. Smith C. Microstructure / C. Smith // Trans. ASM. – 1953. – V.45. – P.533–535.

5. Бунин К. П. О зарождении и строении перлита / К. П. Бунин, Ю. К. Бунина, В. И. Мазур // МетТом. – 1971. – № 10. – С. 6–7.

Bunin K. P. About the origin and structure of pearlite / K. P. Bunin, Y. K. Bunina, V. I. Mazur // Metallurgy and heat treatment of metals. – 1971. – № 10. – P. 6–7.

6. Hillert M. The Formation of Pearlite / M. Hillert // – In. : Decomposition of Austenite by Diffusional Processes. N.Y. – L. : Interscience Publishers. – 1962. – P. 197–247.

7. Бунин К. П. Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. – М. : Металлургия, 1972. – 160 с.

Bunin K. P. The structure of pig iron / K. P. Bunin, Y. N. Taran. – Moscow : Metallurgy, 1972. – 160 p.

8. Механизм и кинетика образования структурно свободного цементита в низкоуглеродистой стали / В. В. Парусов, В. К. Бабич, Л. В. Подобедов [и др.] // Сталь. – 1982. – № 11. – С. 53–62.

The mechanism and kinetics of structural free cementite in the low-carbon steel / V. V. Parusov, V. K. Babich, L. V. Podobedov [et al.] // Steel. – 1982. – № 11. – P. 53–62.

9. Turnbull D. The Cellular and Pearlitic Reactions. Phase Transformation / D. Turnbull, K. N. Tu // Ohio, ASM. – 1970. – P. 487–495.

10. Парусов В. В. Морфологические особенности перлита при превращениях гомогенного аустенита / В. В. Парусов // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск : Видеон. – 1998. – Вып. 2. – С. 355–364.

Parusov V. V. The morphological features of the transformation of pearlite homogeneous austenite / V. V. Parusov // Digest Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. – Dnipropetrovsk : Vision. – 1998. – Issue 2. – P. 355–364.

11. Сухомлин Г. Д. Кристаллогеометрические особенности перлита доэвтектоидной стали / Г. Д. Сухомлин // Физика металлов и материаловедение. – 1976. – Вып. 5. – С. 965–970.

Sukhomlin G. D. Crystal geometry features pearlite of eutectoid steel / G. D. Sukhomlin // The Physics of Metals and Metallography. – 1976. – Issue 5. – P. 965–970.

12. Pitsch W. Der Orientierungszusammenhang zwischen Zementit und Ferrit im Pearlit / W. Pitsch // Acta Met. – 1962, – Vol. 10. – P. 79–80 (errata, «Acta Met.»), – 1962, – Vol. 10, – P. 906).

13. Большаков В. И. Атлас структур металлов и сплавов / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин. – Днепропетровск : ПГАСА, 2010. – 173 с.

Bolshakov V. I. Atlas structures of metals and alloys /

V. I. Bolshakov, G. D. Sukhomlin, D. V. Laukhin. – Dnipropetrovsk : Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2010. – 173 p.

14. Ершов В. М. Высокотемпературное рентгеновское исследование термического расширения решетки цементита / В. М. Ершов // ФММ. – 1981. – Т. 52. – Вып. 5. – С. 1005–1010.

Ershov V. M. High-temperature X-ray study of the thermal expansion of the lattice of cementite / V. M. Ershov // FMM. – 1981. – Vol. 52. – Issue 5. – P. 1005–1010.

15. Kronberg M. L. Secondary recrystallization in copper / M. L. Kronberg, F. N. Wilson // Trans. AIME, – 1949, – Vol. 18, – P. 501–514.

16. Влияние режимов термомеханической обработки на формирование специальных границ в катанке из низкоуглеродистой стали / Парусов В. В., Сухомлин Г. Д., Сагура Л. В. [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – Вып. 64. – С. 238–242.

Influence of thermomechanical treatment on the formation of special boundaries in the low-carbon steel wire rod / Parusov V. V., Sukhomlin G. D., Sahura L. V. [et al.] // Building, materials sciences, mechanic engineering: Digest of scientific papers. – Dnipropetrovsk : Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2012. – Issue 64. – P. 238–242.

17. Фетисов В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. – М. : Мир, 2005. – 198 с.

Fetisov V. P. Strain hardening carbon steel / V. P. Fetisov. – Moscow : World, 2005. – 198 p.

18. Тупшинский Л. И. Структура перлита и конструктивная прочность стали / Л. И. Тупшинский, А. А. Батаев, Л. В. Тихомиров. – Новосибирск : Наука, 1993. – 280 с.

Tushinskiy L. I. Pearlite structure and structural strength of steel / L. I. Tushinskiy, A. A. Bataev, L. V. Tikhomirov. – Novosibirsk : Science, 1993. – 280 p.

19. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – М. : Metallurgia, 1978. – 568 с.

Gorelik S. S. Recrystallization of metals and alloys / S. S. Gorelik. – Moscow : Metallurgy, 1978. – 568 p.

20. Целлермаер В. Я. Субструктурно-фазовые превращения при интенсивной пластической деформации металлов / В. Я. Целлермаер // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1999. – № 12. – С. 44–49.

Tcellermaer V. Y. Substructure and phase transformations during severe plastic deformation of metals / V. Y. Tcellermaer // Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy. – 1999. – № 12. – P. 44–49.

21. Потемкин К. Д. Термическая обработка и волочение высокопрочной проволоки / К. Д. Потемкин. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 120 с.

Potemkin K. D. Heat treatment and drawing high-tensile wire / K. D. Potemkin. – Moscow : Metallurgizdat, 1963. – 120 p.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Левченко Г. В. (Украина) и д.т.н., с.н.с. Бобырем С. В. (Украина)*

Поступила в редакцию 21.03.2015

Принята в печать 24.03.2015