

**Парусов Э.В.,\***  
**Губенко С.И.,\*\*\***  
**Сычков А.Б.,\*\***  
**Сагура Л.В.,\*\***  
**Чуйко И.Н.\***

\*Институт черной металлургии  
им. З. И. Некрасова НАН Украины,  
г. Днепропетровск, Украина,  
\*\*Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г. И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия,  
\*\*\*ГВУЗ «Металлургическая академия  
Украины»,  
г. Днепр, Украина  
**E-mail: tometal@ukr.net**

## О ПОВЕДЕНИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

УДК 669.14.018.295:669.15'784-194

Изучены особенности трансформации неметаллических включений и проанализирован механизм их деформации на различных технологических этапах производства холоднодеформированной проволоки.

Материал исследования: непрерывнолитая заготовка квадратного сечения 125 × 125 мм; горячекатаный бунтовой прокат диаметром 8,0 мм; холоднодеформированная проволока диаметром 3,0 мм из высокоуглеродистой стали С86D.

Показано, что неметаллические включения оказывают значимое влияние на процессы структурообразования сталей перлитного класса. В процессе деформации стали как при горячей прокатке, так и холодной пластической деформации характерной чертой является образование вихревых зон, что свидетельствуют о неоднородном распределении напряжений вблизи включений и их постоянным перераспределением при переходе от одного очага деформации к другому. Вследствие различной пластичности фаз гетерофазных включений, может наблюдаться их разрушение вдоль межфазных границ. При волочении на границах раздела включения с матрицей концентрируются большие напряжения, чем при горячей прокатке. Это обусловлено тем, что с ростом суммарного обжатия металла уменьшается пластичность самой матрицы и затрудняется ее течение вдоль поверхности раздела с включением.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, высокоуглеродистая сталь, бунтовой прокат, проволока, деформация.

### Введение

Развитие современного машиностроения и строительной индустрии обуславливает необходимость освоения высококачественного сортамента сталей, производство которых основывается на совершенствовании известных металлургических процессов. Известно, что неметаллические включения образуются при выплавке стали и оказывают значимое влияние на механические и эксплуатационные показатели даже в том случае, когда их количество в стали незначительно. Включения вызывают изменение условий кристаллизации сплавов, влияют на деформируемость металла, а также способствуют формированию структурной и химической неоднородности сталей [1 - 2]. С целью углубленного анализа причин образования и разработки мероприятий, направленных на снижение загрязненности сталей включениями, необходимо знать их химический и фазовый состав, а также источники появления. В работе [3] рассмотрено влияние технологических факторов на изменение характеристик (состав, морфология, размер, распределение) включений в структуре высокоуглеродистой стали. В результате промышленного внедрения усовершенствованной технологии выплавки и внепечной обработки удалось существенно снизить размер неметаллических включений в бунтовом прокате из высокоуглеродистой стали [3, 4]. Вопросам повышения чистоты сталей по снижению содержания неметаллических включений посвящены многочисленные исследования [5 - 12], однако они не всегда дают исчерпывающие объяснения по указанным проблемам, ввиду отсутствия комплексных исследований в технологической цепочке горячая прокатка непрерывнолитой заготовки → производство холоднодеформированной проволоки. Для всестороннего изучения поведения включений при производстве проволоки, необходимо проанализировать особенности трансформации включений в процессе различного деформационного воздействия на стальную заготовку и бунтовой прокат.

### Цель работы

Изучить особенности трансформации неметаллических включений и проанализировать механизм их деформации на различных технологических этапах производства холоднодеформированной проволоки.

## Материал и методика исследований

В качестве материала при проведении исследований использовали: непрерывнолитую заготовку квадратного сечения  $125 \times 125$  мм; горячекатаный бунтовой прокат диаметром 8,0 мм; холоднодеформированную проволоку диаметром 3,0 мм из высокоуглеродистой стали С86D, химический состав которой соответствовал требованиям EN 16120-2:2011. Горячая прокатка стальной заготовки в бунтовой прокат осуществлялась на непрерывном мелкосортно-проволочном стане 320/150, а последующая переработка в проволоку (холодная деформация) выполнялась на прямоточном 9-ти кратном волочильном стане. Суммарное относительное обжатие проката при производстве холоднодеформированной проволоки составляло  $\sim 86$  %. Используемое оборудование: оптические световые микроскопы «Neophot-32», «Axiovert 200M MAT», растровый электронный микроскоп «VEGA TS5130MM».

## Результаты исследований и их обсуждение

В работе авторов установлено, что основными видами включений при производстве высокоуглеродистой стали являются простые силикаты  $\text{SiO}_2$ , а также силикаты железа, марганца, кальция, железомарганцевые сульфиды и оксиды марганца, кальция, алюминия [3]. Встречаются также алюмосиликаты, оксисульфиды и другие сложные виды включений. Технологический процесс производства готовой метизной продукции – проволоки включает стадии горячей (бунтовой прокат) и холодной (проволока) пластической деформации. Горячая деформация (прокатка) представляет собой сложный многопроходной процесс производства бунтового проката, при котором на многоклетьевом прокатном стане происходит преобразование заготовки квадратного сечения ( $150 \times 150$  мм или  $125 \times 125$  мм) в прокат круглого сечения ( $\varnothing 5,5 \dots 16,0$  мм) с использованием системы калибровки прокатных клетей и профилей овал  $\leftrightarrow$  круг.

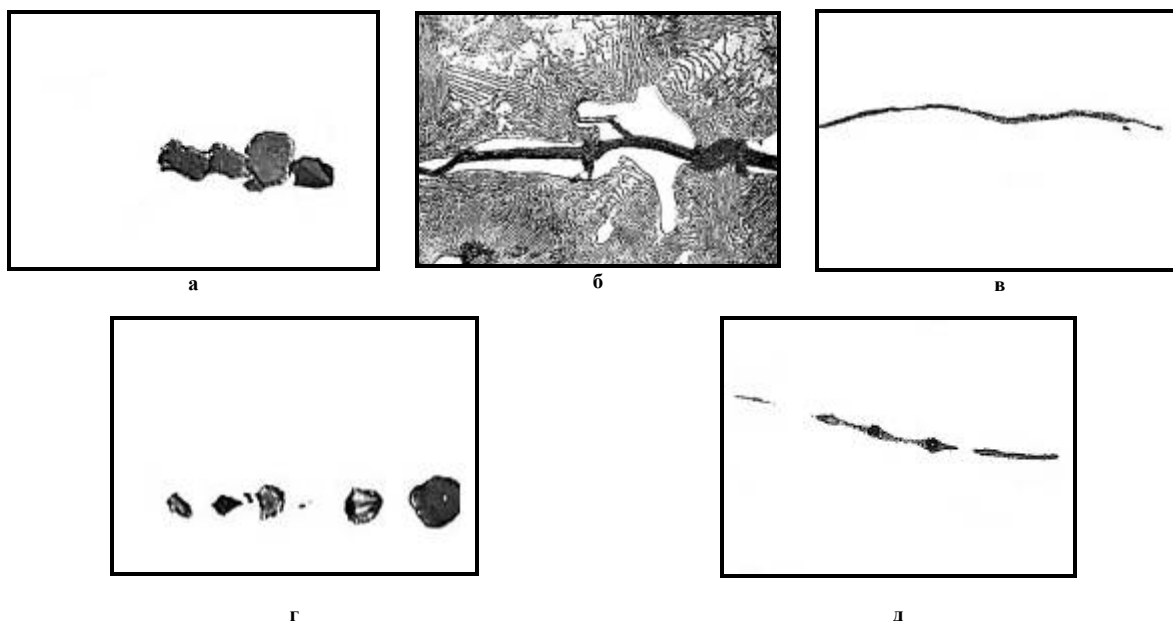
Средняя температура заготовки после нагрева в печи перед началом горячей прокатки составляет  $\sim 1100 \dots 1150$  °С, температура окончания деформации при выходе металла из последней чистовой клетки проволочного блока  $\sim 1150 \dots 1050$  °С. Столь небольшое различие температур начала и окончания деформации связано с разогревом металла в процессе горячей деформации, что обусловлено высокоскоростным процессом ее прохождения (скорость движения раската в зависимости от конечного профилирующего проката на проволочной линии составляет  $18 \dots 100$  м/с), а также незначительными межклетьевыми паузами порядка  $7 \dots 0,05$  с. Температура виткообразования (аустенитизации) проката, при передвижении металла от чистовой клетки проволочного блока до приемного стола (первая секция роликового транспортера) линии Стелмор, может изменяться в широком диапазоне ( $1050 \dots 900$  °С), в зависимости от заданных параметров режима деформационно - термической обработки.

При горячей прокатке поведение неметаллических включений зависит от уровня их пластичности. Силикаты  $\text{SiO}_2$  пластически не деформируются на всех этапах горячей деформации, они хрупко разрушаются, а осколки включений перераспределяются в строчки в направлении деформации (рис. 1, а). Более сложные типы силикатов ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ) пластически деформируются и удлиняются в направлении прокатки, поскольку температурный интервал деформации соответствует их пластическому состоянию (рис. 1, б). В процессе горячей прокатки форма пластичных силикатов постоянно изменяется: они попеременно приобретают овальную и круглую формы, что связано с чередованием деформации литой заготовки в прокатных клетях с различным расположением валков (вертикальные и горизонтальные группы, кантовка раскатов после нечетных клетей и т.п.).

Следовательно, при постоянном удлинении пластичных силикатов в направлении течения стальной матрицы происходит изменение их формы в поперечном сечении. В то же время, в горячекатаном бунтовом прокате эти включения в поперечном сечении имеют сферическую форму. Некоторые силикатные включения при горячей деформации вязко разрушаются в процессе пластического удлинения и раскатываются в очень тонкие «нити». В отличие от результатов исследований, изложенных в работах [1, 13 - 17], где температура горячей деформации сталей составляла менее 900 °С и фиксировалось хрупкое разрушение аналогичных видов силикатных включений после их пластического удлинения, в нашем случае это явление не наблюдалось.

Пластичность железомарганцевых сульфидов при горячей прокатке различна и зависит от содержания в них марганца и железа: пластичность сульфидных включений повышается с уменьшением содержания марганца [1, 13 - 17]. Наряду с легко деформируемыми сульфидами (рис. 1, в), обнаружены слабо деформированные сульфидные частицы. Следует отметить, что в процессе пластического удлинения происходит многократное преобразование оладеобразной пространственной формы сульфидов в стержневую (строчечную).

Включения алюмосиликатов, оксидов марганца, кальция, алюминия пластически не деформируются на всех стадиях горячей деформации и располагаются в виде строчек в направлении течения стали (рис. 1, г). Часть включений хрупко разрушается, а и их осколки располагаются в строчки в виде отдельных включений.



**Рис. 1 – Неметаллические включения (× 500)  
в бунтовом прокате после горячей деформации**

Оксисульфидные включения, представляющие собой частицы недеформируемой фазы (оксида), заключенной в пластичную сульфидную матрицу, проявляют неоднородную деформируемость. Пластичная сульфидная фаза легко деформируется совместно с матрицей, а находящееся внутри включение твердой фазы не изменяет своей формы (рис. 1, д).

Действующие со стороны матрицы напряжения расходятся на деформацию пластичной сульфидной фазы, которая не сопротивляется течению металлической матрицы и сама легко деформируется, что уменьшает напряжения, действующие на недеформируемую фазу включения. Частицы недеформируемых фаз в ряде случаев прорывают оболочку и соприкасаются с металлической матрицей. Под действием сил трения со стороны матрицы, из-за различного поведения фаз включения, происходит разделение вдоль поверхности их раздела, фазы разобщаются и продолжают существовать самостоятельно. Это приводит к изменению типа включений в процессе деформации: вместо сложных гетерофазных включений в стали существуют два разных по составу, структуре и свойствам вида однофазных включений.

Холодная пластическая деформация горячекатаного бунтового проката из стали С86D диаметром 8,0 мм волочением при производстве проволоки диаметром 3,0 мм происходит при 8 ... 9-ти кратной деформации с суммарным относительным обжатием ~ 86 %. При волочении проката деформация включений происходит в условиях, когда в результате действия пониженных температур изменяются физико-механические свойства включений и матрицы. В таких условиях деформации пластичны только сульфидные включения (рис. 2, а, б). Включения силикатов  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ , имеющие после горячей деформации строчечную форму, при холодной деформации – волочении не пластичны и хрупко разрушаются (рис. 2, в, г). Осколки раздробленных включений увлекаются текущим металлом матрицы, перемещаются относительно друг друга и вместо вытянутых включений образуются строчки из их осколков. Включения алюмосиликатов, оксидов марганца, кальция, алюминия пластически не деформируются и хрупко разрушаются (рис. 2, д). Осколки раздробленных включений увлекаются текущим металлом матрицы и трансформируются в виде образования вытянутых строчек.

Оксисульфидные включения проявляют неоднородную деформируемость, связанную с различным уровнем пластичности составляющих фаз (рис. 2, е): пластичная сульфидная фаза деформируется совместно с матрицей, сохраняя стержневую пространственную форму, полученную в результате горячей деформации, а включение оксидной фазы не изменяет своей формы. Сульфидная фаза хорошо деформируется, вытягиваясь в направлении деформации, образует пологий склон от середины к краю включения.

На основании изложенного, целесообразно проанализировать механизмы деформации неметаллических включений на различных технологических этапах деформационной обработки высокоуглеродистых сталей: при производстве горячекатаного бунтового проката и холоднодеформированной проволоки.

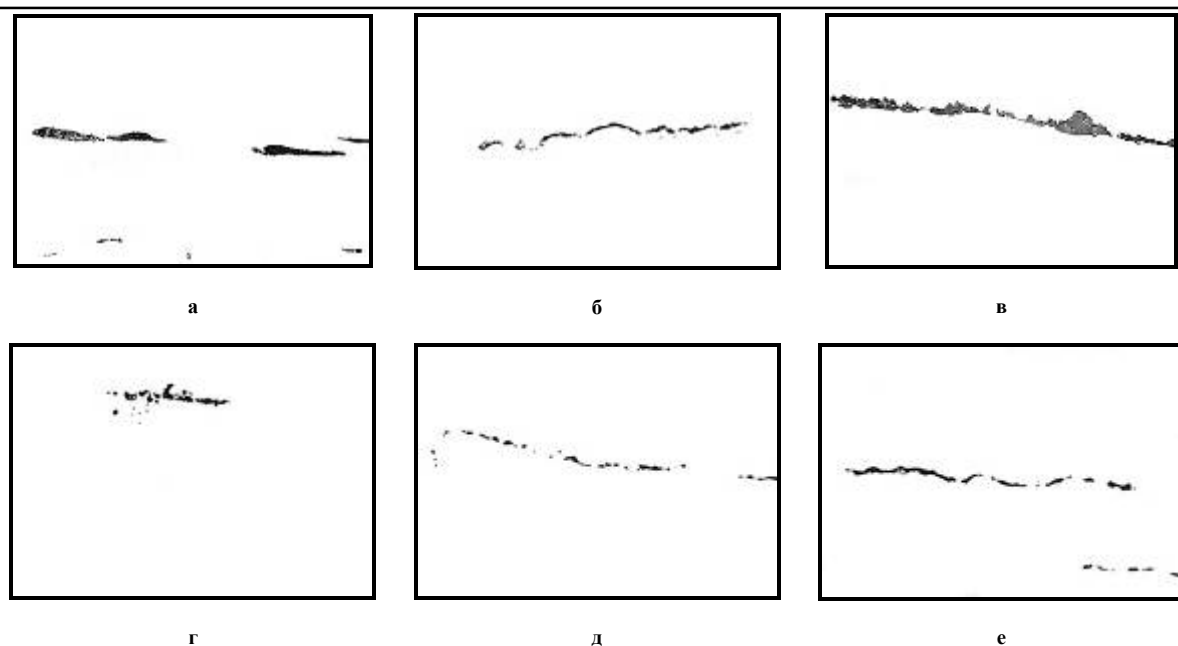
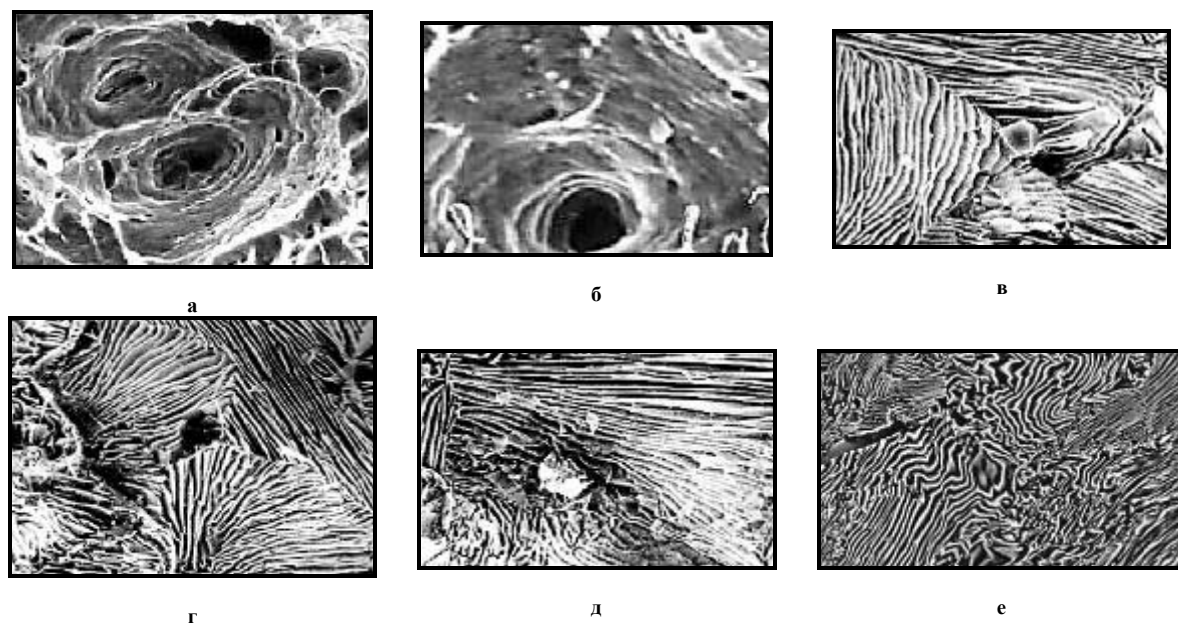


Рис. 2 – Неметаллические включения ( $\times 500$ ) в холоддеформированной проволоке (суммарное относительное обжатие бунтового проката 85,9 %)

На каждый вид включений при многопроходной горячей прокатке действуют нормальные сжимающие напряжения, обусловленные давлением деформирующего инструмента (прокатные валки), передающиеся через металлическую матрицу, продольные сдвиговые напряжения, возникающие в матрице при ее деформации, а также напряжения трения на поверхности раздела включение-матрица. Величина нормальных напряжений зависит от давления деформирующего инструмента и сдвиговых напряжений – пластичности металлической матрицы, определяемой температурой и структурой стали. Поскольку в результате кантовки раскатов на  $90^\circ$  после каждого нечетного прохода прокатных клетей (а в проволочном блоке, где валки в клетях располагаются по углом  $45^\circ$ , после каждого прохода) изменяются условия деформации стальной заготовки, а также схемы главных напряжений и деформаций, в каждой клетке соответственно меняются и напряжения, действующие на неметаллические включения. Вполне очевидно, что при деформации в каждой клетке пластичные включения удлиняются, а недеформируемые включения частично раздробляются и перераспределяются с образованием строчек в направлении оси деформации. Поскольку преобладающие схемы главных напряжений в разных клетях многоклетьевого стана различны, то изменяется и характер формоизменения пластичных включений при чередовании прокатных клетей.



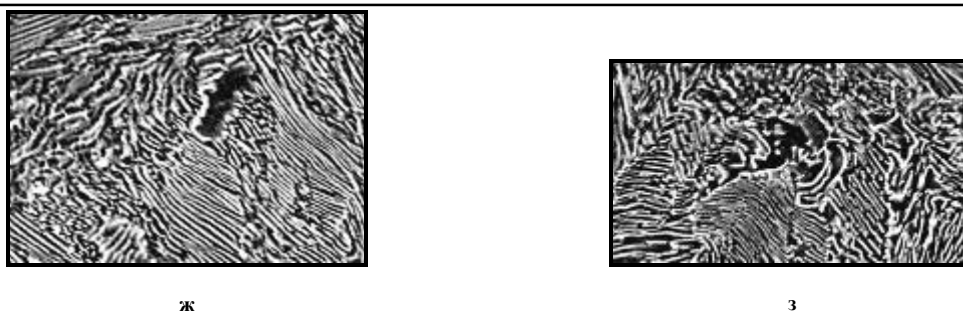


Рис. 3 – Локальная структура бунтового проката из стали S82D вблизи неметаллических включений:  
а, б –  $\times 1500$ ; в-з –  $\times 5000 \times 3$

Этот процесс сопровождается появлением вихревых зон вблизи включений, которые свидетельствуют о развитии ротационной деформации в этих участках (рис. 3, а, б), что связано с неоднородным распределением напряжений вблизи включений и их постоянным перераспределением при переходе от одной прокатной клетки к другой.

Возникающие крутящие (ротационные) напряжения могут вызвать вращение включений при переходе от одной клетки к другой, что взаимосвязано с вихревым течением аустенитной матрицы в контакте с неметаллическим включением. При горячей прокатке стальной заготовки включения находятся в сложнапряженном состоянии, которое постоянно изменяется в процессе деформации. В условиях высоких давлений и температур взаимодействие контактирующих поверхностей включения и стальной матрицы их деформация происходит путем установления механического контакта и развития диффузионных процессов. Механический контакт происходит в результате сглаживания неровностей поверхности путем развития трения их поверхностей друг относительно друга, что способствует прирабатываемости пары трения включение-матрица.

Между включением и стальной матрицей развивается контактное трение, обусловленное взаимодействием их поверхностей, препятствующее их относительно перемещению. Рассматриваемое трение является кинематическим сухим трением скольжения, в виду того, что реализуется без какой-либо смазки при поступательном перемещении стальной матрицы по поверхности недеформируемого включения или между движущейся матрицей и пластичным включением. Возникновение сил трения происходит за счет зацепления неровностей поверхностей включение - матрица, а также сцепления между их молекулами в областях непосредственного соприкосновения (межфазная граница раздела). Согласно закону Амонтона, сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления между поверхностями трущихся тел:

$$F = f \cdot N, \quad (1)$$

где  $F$  – сила трения скольжения;

$f$  – безразмерный коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств материалов трущихся тел

$N$  – сила нормального давления.

Однако этот закон не учитывает молекулярное взаимодействие между трущимися телами. Для случая деформирующейся системы стальная матрица-включение более точным является закон трения, учитывающий влияние сил притяжения между молекулами трущихся тел:

$$F = \mu \cdot (N + S \cdot \rho_0), \quad (2)$$

где  $\mu$  – истинный коэффициент трения;

$\rho_0$  – добавочное давление, вызванное силами молекулярного притяжения;  $S$  – общая площадь непосредственного контакта между телами.

Силы трения на поверхности включение-матрица при обработке стали давлением имеют также составляющие, обусловленные типом и строением межфазных границ и связанные с определенной поверхностной энергией, а также с трением, возникающим при перемещении (скольжении) межфазных дислокаций и дисклинаций:

$$F = \mu \cdot [N + S(\rho_0 + \gamma_{e-m} \div D_e + b \cdot \tau_D \div l_1 + \omega \cdot \tau_D \div l_2)], \quad (3)$$

где  $\gamma_{e-m}$  – удельная поверхностная энергия границы включение-матрица;

$l_1, l_2$  – длина подвижных межфазных дислокаций и дисклинаций соответственно;

$b$  – вектор Бюргерса межфазных дислокаций;

$\omega$  – вектор поворота межфазных дисклинаций;

$\tau_d$  – касательное напряжение деформационного происхождения, действующее вдоль межфазной границы;

$D_0$  – размер включения.

Силы трения сдерживают течение стальной матрицы вокруг включения и распределены по границе раздела неравномерно. Это обусловлено, в первую очередь неравномерным распределением нормальных напряжений, действующих на включение, при деформации в разных прокатных клетях и их перераспределением. Силы трения на границе раздела определяются температурой и степенью деформации, формой и размером включения и увеличиваются с понижением температуры, повышением обжатий и размера включения. Влияние температуры выражается через коэффициент трения, значения которого различны для каждой из конкретных температур. Влияние размера и формы включения проявляются через площадь контакта, причем для разных типов включений, как известно, эта величина в процессе деформации изменяется по-разному [1, 13 - 17]. У пластичных включений, изменяющих форму от исходной равноосной (компактной) до овальной и стержневой, попеременно в разных прокатных клетях, величина площади контакта в процессе деформации возрастает, причем неравномерно. Это определяется тем, какая из форм включений формируется в конкретной клетке, что влечет за собой повышение сил трения. У недеформируемых включений в процессе горячей деформации площадь контакта не изменяется. В случае, когда включение разрушается, площадь контакта возрастает, однако ее влияние на силы трения уравнивается уменьшением размера включений. Влияние степени деформации проявляется в первую очередь через повышение плотности межфазных дефектов. Контактное трение усиливает неоднородность деформации, поскольку в каждой точке поверхности контакта возникают элементарные касательные силы трения, что вызывает появление дополнительных напряжений на межфазной границе, ориентированных противоположно направлению скольжения матрицы относительно включения. Это может оказать влияние не только на уровень напряжений, действующих на включение, но и на схему напряженного состояния вблизи включения в каждой из прокатных клетей при производстве металла.

Таким образом, неметаллические включения при производстве бунтового проката из литой заготовки испытывают со стороны стальной матрицы действие неоднородных напряжений, что обусловлено постоянно изменяющимся характером и распределением этих напряжений при изменении схемы деформации в процессе чередования прокатных клетей с различным расположением валков. Уровень механических характеристик включений определяет их реакцию на действующие силы и определяет их способность к пластической деформации. Силикаты пластичные и сульфидные включения под действием сил на границах раздела с пластически деформирующейся аустенитной матрицей деформируются сами. При этом в процессе пластического удлинения включений происходит постоянное изменение их формы, что приводит к образованию в горячедеформированном бунтовом прокате стержневой (строчечной) формы указанных включений. В процессе горячей деформации в зависимости от группы прокатных клетей (черновая, промежуточная, чистовая) на определенном этапе температура металла снижается, что повышает силы трения на поверхности раздела матрица-включение и уменьшает пластичность силикатных включений, однако в виду того, что эта температура не снижается ниже 900 °С (снижение пластичности силикатов), то хрупкое их разрушение не наблюдается. В то же время тонко раскатанные включения могут разрушаться вязко при исчерпании их ресурса пластичности.

Процесс изменения формы пластичных включений сопровождается динамической миграцией межфазных границ матрица-включение, однако этот процесс отличается от известной миграции границ зерен [1, 13-17]. Поверхности раздела матрица-включение перемещаются как одно целое в результате изменения их кривизны под действием внешних и внутренних напряжений с целью принятия формы, обеспечивающей минимум поверхностной энергии для конкретных условий деформации. При этом в процессе передвижения (переходе) раската от одной прокатной клетки к другой изменяются условия, обеспечивающие минимум поверхностной энергии межфазных границ. В то же время динамическая миграция межфазных границ сопровождается перераспределением решеточных и межфазных дислокаций, диффузионными процессами в межфазных границах и прилегающих областях матрица-включение, а также проскальзыванием вдоль этих границ.

В случае недеформируемых видов неметаллических включений (силикатов хрупких и недеформирующихся, оксидов, алюминатов) на поверхности раздела с матрицей концентрируются сжимающие и сдвиговые напряжения, приводящие к разрушению, в том случае, когда они превышают предел прочности включений при сжатии [1, 13 - 17]. Хрупкое разрушение недеформируемых включений происходит на всех этапах деформации, независимо от изменения характера распределения напряжений в прокатных клетях, и приводит к постепенному изменению дисперсности включений. После разрушения осколки включений увлекаются деформирующейся матрицей, разворачиваются и продолжают движение в направлении ее течения, а пространство между ними заполняется металлом за счет высокого давления и температуры деформации.

Что касается гетерофазных включений сульфид-оксид, напряжения, действующие со стороны аустенитной матрицы, расходятся на деформацию пластичной сульфидной фазы, которая не сопротив-

ляется течению металлической матрицы и легко деформируется, что уменьшает напряжения, действующие на недеформируемую фазу включений. Под воздействием сил контактного трения из-за различного поведения фаз включений происходит их разделение – фазы разобщаются и существуют самостоятельно. Поворот осколков фаз включения свидетельствует об их независимом перемещении в движущейся матрице.

В процессе динамической миграции границы пластичное включение-матрица, а также границы недеформируемое включение-матрица, не претерпевающие динамическую миграцию, могут поглощать решеточные дислокации [1, 13 - 17]. Это вызывает процессы возврата в этих межфазных границах, вызывающие при высоких температурах диссоциацию захваченных дислокаций на межфазные, аннигиляцию и перестройки в ансамбле межфазных дислокаций, что приводит к проскальзыванию вдоль границ включение-матрица. Рассмотренные процессы, безусловно, оказывают существенное влияние на поведение высокоуглеродистых сталей при деформационном воздействии.

После окончания горячей прокатки литой заготовки из высокоуглеродистой стали при выходе металла из последней чистовой клетки проволочного блока и передвижении к участку водяного охлаждения или до виткообразователя линии Стелмор происходит его естественное охлаждение на спокойном воздухе. При последующем интенсивном воздушном охлаждении разложенного на витки проката на транспортере линии Стелмор происходит диффузионный распад аустенита с образованием структуры перлита. По нашему мнению, включения, очевидно, являются дополнительными центрами для начала развития этого превращения, от которых могут начинать свое зарождение перлитные колонии. Мелкие частицы включений нередко наблюдаются в местах стыка перлитных колоний (рис. 3, в, г), кроме того вблизи таких включений наблюдается их изгиб и диспергирование (рис. 3, д - з).

При волочении бунтового проката формоизменение неметаллических включений продолжается в новых условиях по сравнению с горячей прокаткой литой заготовки, что обусловлено в первую очередь различием температур и деформирующих усилий, а также самого способа деформации. При этом изменяются и физико - механические свойства включений и стальной (перлитной) матрицы. Поведение включений всех видов при волочении связано с уровнем их пластичности при конкретной температуре. В отличие от условий горячей прокатки, при волочении формоизменение самого металла, а следовательно, и включений происходит при постоянном характере распределения напряжений в стальной матрице, уровень которых возрастает при переходе к каждой последующей монолитной волоке (очагу деформации). На каждое из включений при волочении действуют нормальные сжимающие напряжения от давления деформирующего инструмента, передающиеся через металлическую матрицу, продольные сдвиговые напряжения, возникающие в матрице при ее деформации, а также напряжения трения на поверхности раздела включение-матрица. Величина нормальных напряжений зависит от маршрута волочения и степени суммарного относительного обжатия бунтового проката, а сдвиговых – от пластичности металлической матрицы, определяемой ее структурой и степенью наклепа в процессе деформации. На неметаллические включения при волочении действуют трехмерные далекодействующие поля напряжений, имеющие сложную пространственную конфигурацию и характеризующееся различными длинами волн, средних амплитуд, дисперсией, пространственно локализованными минимумами или максимумами. Следует отметить, что пространственно неоднородные поля напряжений от деформационного воздействия, действующих на включение, являются динамическими и претерпевают постоянные изменения, то есть эволюционируют.

Под действием таких сложных напряжений происходит пластическая деформация сульфидов, которые имеют после горячей прокатки стержневую форму, и сохраняют ее в процессе холодной деформации волочением. Как было показано, оксисульфидные включения проявляют неоднородную деформируемость, связанную с различным уровнем пластичности составляющих фаз: пластичная сульфидная фаза деформируется совместно с перлитной матрицей, сохраняя стержневую пространственную форму, полученную в результате горячей деформации, а включение оксидной фазы не изменяет своей формы. Вследствие различной пластичности фаз гетерофазных включений, может наблюдаться их разрушение вдоль межфазных границ сульфид-оксид. Остальные виды включений (силикаты, оксиды) не пластичны, хрупко разрушаются и их осколки перераспределяются в направлении течения (деформации) перлитной матрицы. При волочении на границах раздела включения с матрицей концентрируются большие напряжения, чем при горячей прокатке. Это обусловлено тем, что с ростом суммарного обжатия металла уменьшается пластичность самой матрицы и затрудняется ее течение вдоль поверхности раздела с включением. Кроме того, в данном случае исключены процессы восстановления (рекристаллизации) деформированной структуры, способствующие релаксации напряжений, что уменьшает пластичность включений и способствует повышению сил трения вдоль поверхности раздела матрица-включение. Все это приводит к разрушению недеформируемых включений. Если разрушение происходит на конечных этапах деформации и обломки включения отделяются друг от друга на большое расстояние, металл матрицы не успевает заполнить пространство между ними и возникают пустоты. С повышением степени деформации при волочении увеличивается дисперсность всех видов неметаллических включений, в том числе и недеформирующихся в результате их хрупкого разрушения.

При холодной деформации бунтового проката образуется характерная волокнистая структура стали, происходит взаимодействие между частицами включений и деформирующейся перлитной матрицей. Во время волочения металла на каждое перлитное зерно действуют нормальные сжимающие силы от деформирующего инструмента (монокристаллических волокон), в результате возникают релаксирующие касательные напряжения, под действием которых матрица течет в направлении деформации, а зерна приобретают вытянутую форму. Стальная матрица соприкасается с включениями и на межфазной границе раздела возникают силы трения, препятствующие ее течению. Свободное развитие деформации перлита вблизи включений тормозится уже на ранних стадиях пластической деформации. В этом случае наблюдается изгиб пластин перлитных колоний (рис. 4, а - в, д), возникают локальные зоны концентрации напряжений (рис. 4, е - з) и участки структуры металла с развитием неоднородной деформации (рис. 4, г).

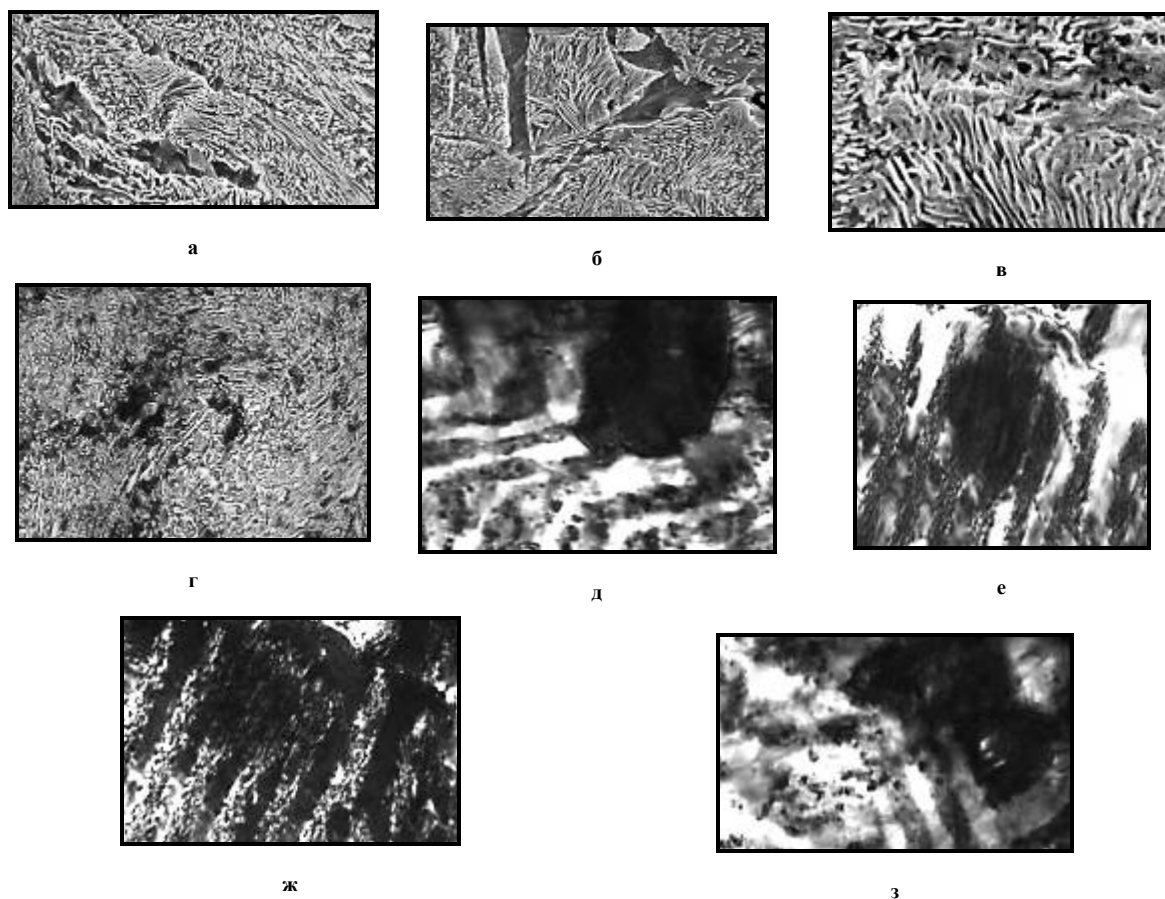


Рис. 4 – Локальная структура стали в холоднодеформированной проволоке вблизи неметаллических включений после различных степеней деформации при волочении: а - г –  $\times 5000$ ; д - з –  $\times 25000$

## Выводы

В результате исследований, направленных на изучение поведения основных видов неметаллических включений при производстве холоднодеформированной проволоки на различных технологических этапах (производство стальной заготовки и бунтового проката) установлены отличительные признаки механизмов трансформации включений при горячей прокатке и холодной деформации. Показано, что неметаллические включения оказывают значимое влияние на процессы структурообразования сталей перлитного класса. В процессе деформации стали как при горячей прокатке, так и холодной пластической деформации (волочении) характерной чертой является образование вихревых зон, что свидетельствует о неоднородном распределении напряжений вблизи включений и их постоянном перераспределении при переходе от одного очага деформации к другому (прокатные клетки, монокристаллические волокна). Вследствие различной пластичности фаз гетерофазных включений, может наблюдаться их разрушение вдоль межфазных границ. При волочении на границах раздела включения с матрицей концентрируются большие напряжения, чем при горячей прокатке. Это обусловлено тем, что с ростом суммарного обжатия металла уменьшается пластичность самой матрицы и затрудняется ее течение вдоль поверхности раздела с



включением. В данном случае процессы восстановления (рекристаллизации) деформированной структуры исключены, что уменьшает пластичность включений и способствует повышению сил трения вдоль поверхности раздела матрица-включение. Если разрушение происходит на конечных этапах деформации и обломки включения отделяются друг от друга на большое расстояние, то металл матрицы не успевает заполнить пространство между ними и образуются пустоты, которые вызывают повышенную обрывность металла на последних этапах волочения, а также снижают эксплуатационные показатели готовых изделий. Следовательно, совершенствование технологических параметров производства высокоуглеродистой стали, направленное на снижение загрязненности металла неметаллическими включениями позволит гарантированно повысить пластические показатели бунтового проката как в горячекатаном состоянии, так и при переработке на метизном переделе.

### Литература

1. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2005. – 536 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей / С. И. Губенко. – Саарбрюкен (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. – 549 с.
3. Парусов Э. В. Изменение характеристик и компонентного состава неметаллических включений на различных технологических этапах производства бунтового проката / Э. В. Парусов, С. И. Губенко, А. Б. Сычков [и др.] // XV-а Всеукраїнська науково-практична конференція «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Національний технічний університет України, Київський політехнічний інститут, інженерно-фізический факультет, 11 квітня 2017 г., Україна, Київ. // Матеріали конференції. – 2017. – С. 818-838.
4. Забезпечення наднизького вмісту сірки в процесі позапічної обробки сталі / Е. В. Парусов, О. Б. Сичков, Л. В. Сагура, І. М. Чуйко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2017. – № 1. – С 1-6. <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/475>.
5. Явойский, В.И. Неметаллические включения и свойства стали [Текст] / В.И. Явойский, Ю.И. Рубенчик, А.П. Оленко. – М. : Металлургия, 1980. – 176 с.
6. Поведение кислорода и оксидных включений при кристаллизации и последующих охлаждений стали [Текст] / В.И. Явойский, С.А. Ближнюков, А.Ф. Вишкарев, Л.С. Горохов // Сталь. – 1975. – № 1. – С. 26 – 31.
7. Проблема кислорода и качества стали на пороге XXI века [Текст]: Труды Международной конференции, посвященной 90-летию В. И. Явойского, Киев–Днепродзержинск, 1991 г.: тезисы докладов / В.П. Лузгин, С.А. Ближнюков. – К. – 1991. – С. 59 – 62.
8. Влияние дувания в ковш твердых веществ на степень чистоты стали по сульфидным и оксидным включениям [Текст] / Г. Космидер, Г.Ю. Лангхаммер, Х. Абротис и др. // Черные металлы. – 1979. – № 22. – С. 18 – 23.
9. Неметаллические включения и дефекты в электрошлаковом слитке [Текст] / С.Е. Волков, А. Е. Волков, Ю.Н. Заблудов и др. – М. : Металлургия, 1979г. – 135 с.
10. Опыт применения проволоки с наполнителем из силикокальция для внепечной обработки стали [Текст] / В. Карузо, А. Коперчини А., А. Джаноне и др. // Черные металлы. – 1984. – № 6 – 7. – С. 39 – 45.
11. Энгель, Г.Ю. Удаление примесей из жидкой стали металлическим кальцием и шлаками на основе галогенидов кальция [Текст] / Г. Ю. Энгель, М. Келер, Г. Фляймер и др. // Черные металлы. – 1984. – № 9. – С. 23 – 30.
12. Парусов, В.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки [Текст] / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, Э.В. Парусов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2012. – 376 с.
13. Бельченко Г. И. Неметаллические включения и качество стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К. : Техника, 1980. – 168 с.
14. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали / С. И. Губенко. – М. : Металлургия, 1991. – 225 с.
16. Губенко С. И. Деформация металлических материалов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2006. – 316 с.
17. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений / С. И. Губенко. – Днепропетровск : НМетАУ. ИЦ «Системные технологии», 2014. – 301 с.

Поступила в редакцию 16.05.2017

Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B., Sahura L. V., Chuyko I. N. **On behavior of non-metallic inclusions on different stages of deformation in the manufacture of high-strength wire**

The features of transformation of non-metallic inclusions are studied and the mechanism of their deformation at various technological stages of production of cold-deformed wire is analyzed.

Material of the study: continuous casting of square section 125×125 mm; hot-rolled steel with a diameter of 8,0 mm; cold-deformed wire with a diameter of 3,0 mm of high-carbon steel C86D.

It is shown that non-metallic inclusions have a significant influence on the processes of the structure formation of steels of the pearlite class. In the process of steel deformation both in hot-rolling and cold-plastic deformation, the characteristic feature is the formation of vortex zones, which indicates an inhomogeneous distribution of stresses near the inclusions and their constant redistribution during the transition from one deformation focus to the other.

Due to the different phase plasticities of heterophase inclusions, their destruction along interphase boundaries can be observed. When drawing at the boundaries of the inclusion section with the matrix, more stresses are concentrated than in hot rolling. This is due to the fact that with increasing total reduction of the metal, the plasticity of the matrix decreases and its flow along the interface with the inclusion is hampered.

**Key words:** non-metallic inclusions, high-carbon steel, rolled steel, wire, deformation.

### References

1. Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevyanchenko I. V. Nemetallicheskie vklucheniya v stali, Dnepropetrovsk : Art-press, 2005, 536 p.
2. Gubenko S. I. Nemetallicheskie vklucheniya i plastichnost staley. Fizicheskie osnovyi plastichnosti staley, Saarbrücken: LAP LAMBERT, Palmarium academic publishing, 2016, 549 p.
3. Parusov E. V., Gubenko S. I., Sychkov A. B. Izmenenie harakteristik i komponentnogo sostava nemetallicheskih vklucheniy na razlichnykh tehnologicheskikh etapah proizvodstva buntovogo prokata. XV-a Vseukrainskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Spetsialnaya metallurgiya: vchera, segodnya, zavtra», Natsionalnyiye tehnikheskiy universitet Ukrainyi, Kievskiy politehnikheskiy institut, inzhenerno-fizicheskiiy fakultet, 11 aprelya 2017 g., Ukraina, Kiev. Materialy konferentsii, 2017, pp. 818-838.
4. Parusov E. V., Sichkov O. B., Sahura L. V., Chuiko I. M. Zabezpechennya nadnizkogo vmistu sirki v protsesi pozapichnoyi obrabotki stali, Naukovi pratsi Vinnitskogo natsionalnogo tehnikhnogo universitetu, 2017, No 1, pp 1-6. <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/475>.
5. Yavovskiy V. I., Rubenchik Yu.I., Olenko A.P. Nemetallicheskie vklucheniya i svoystva stali. M. : Metallurgiya, 1980, 181-205 p.
6. Yavovskiy V. I., Bliznyukov S. A., Vishkarev A. F., Gorohov L. S. Povedenie kisloroda i oksidnykh vklucheniy pri kristallizatsii i posleduyuschih ohlazhdeniy stali. Stal, 1975, No 1, pp. 26 – 31.
7. Luzgin V. P., Bliznyukov S. A. Problema kisloroda i kachestva stali na poroge XXI veka. Trudyi Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyaschenoy 90-letiyu V. I. Yavovskogo, Kiev–Dneprodzerzhins, 1991, pp 59-62.
8. Kosmider G., Langhamer G. Yu, Abratis H. Vliyanie vduvaniya v kovsh tverdyyh veschestv na stepen chistoty stali po sulfidnyim i oksidnyim vklucheniyam. Chernyye metallyi, 1979, No 22, pp. 18 – 23.
9. Volkov S. E., Volkov A. E., Zabsluev Yu. N. Nemetallicheskie vklucheniya i defekty v elektroshlakovom slitke. M. : Metallurgiya, 1979, 135 p.
10. Karuzo V., Koperchini A., Dzhianone A. Opyit primeneniya provoloki s napolnitelem iz siliko-kaltsiya dlya vnepechnoy obrabotki stali. Chernyye metallyi, 1984, No 6 – 7, pp. 39 – 45.
11. Engel G. Yu., Keler M., Flyaymer G. Udalenie primesey iz zhidkoy stali metallicheskim kaltsiem i shlakami na osnove galogenidov kaltsiya. Chernyye metallyi, 1984, No 9, pp. 23 – 30.
12. Parusov V. V. Sychkov A. B., Parusov E. V. Teoreticheskiiye i tekhnologicheskiiye osnovy proizvodstva vysokoehffektivnykh vidov katanki. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2012, 376 p.
13. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Nemetallicheskie vklucheniya i kachestvo stali. K. : Tehnika, 1980, p. 168.
14. Gubenko S. I. Transformatsiya nemetallicheskih vklucheniy v stali. M. : Metallurgiya, 1991, 225 p.
15. Gubenko S. I., Oshkaderov S. P. Nemetallicheskie vklucheniya v stali. Kiev : Naukova dumka, 2016, 528 p.
16. Gubenko S. I., Parusov V. V. Deformatsiya metallicheskih materialov. Dnepropetrovsk : Art-press, 2006, 316 p.
17. Gubenko S. I. Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklucheniy. Dnepropetrovsk : NMetAU. ITS «Sistemnyye tehnologii», 2014, 301 p.