

## СКЛОННОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ К ПРОЯВЛЕНИЮ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА

**М.А. Смирнов<sup>1</sup>, А.М. Ахмедьянов<sup>2</sup>, О.В. Варнак<sup>1</sup>, А.Н. Мальцева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РосНИТИ), г. Челябинск;*

<sup>2</sup> *Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Эффект Баушингера в трубном производстве может возникнуть при пошаговой формовке труб и экспандировании, а также при правке вырезанных из труб сегментов, предназначенных для изготовления полноразмерных плоских образцов для механических испытаний.

В настоящей работе рассмотрено проявление эффекта Баушингера в низкоуглеродистой трубной стали с феррито-перлитной и феррито-бейнитной структурой, а также как знакопеременное нагружение с последующим низкотемпературным нагревом влияет на склонность стали к деформационному старению и как после старения изменяется эффект Баушингера.

Для исследования эффекта Баушингера образцы подвергали нагружению, включающему растяжение и сжатие, которые выполнялись в разной последовательности. После проведения знакопеременного нагружения деформация образцов отсутствовала.

Установлено, что вне зависимости от схемы нагружения склонность исследуемой стали к проявлению эффекта Баушингера при феррито-бейнитной структуре выше, чем при феррито-перлитной структуре. Знакопеременное нагружение с последующим низкотемпературным нагревом приводит к деформационному старению стали, что сопровождается повышением предела текучести. Величина упрочнения зависит от схемы нагружения перед низкотемпературным нагревом. Склонность к деформационному старению при нагружении по схеме «растяжение + сжатие» не зависит от исходной структуры. Тогда как при схеме нагружения «сжатие + растяжение» при наличии феррито-бейнитной структуры при деформационном старении достигается наибольший уровень предела текучести. Знакопеременное нагружение, осуществляемое в состаренном состоянии, приводит к резкому снижению предела текучести и появлению эффекта Баушингера. От схемы нагружения перед провоцирующим нагревом эффект Баушингера состаренной стали не зависит и в большей мере проявляется при феррито-бейнитной структуре.

*Ключевые слова:* низкоуглеродистая трубная сталь, эффект Баушингера, деформационное старение, феррит, бейнит, механические свойства.

Эффект Баушингера наблюдается в металлических материалах при приложении знакопеременной деформации [1]. Он заключается в следующем. Если образец подвергнуть нагружению, при котором появляется некоторая пластическая деформация, а затем его разгрузить, то при повторном нагружении, но с противоположным знаком, произойдет снижение напряжения пластического течения, т. е. будет иметь место определенное разупрочнение металла.

В трубном производстве эффект Баушингера может возникнуть при некоторых технологических операциях, например, пошаговой формовке и экспандировании труб. Он проявляется также при правке (распрямлении) вырезанных из труб сегментов, предназначенных для изготовления полноразмерных плоских образцов для механических испытаний [2]. Влияние эффекта Баушингера на свойства труб следует ожидать и при прокладке морских трубопроводов с использованием предварительной намотки труб на барабан и последующей их размотке и укладке [3].

Для получения нужного комплекса свойств в трубном производстве применяются разнообразные режимы обработки, при которых могут формироваться феррито-перлитная, феррито-бейнитная, бейнитная и бейнито-мартенситная структуры. Следует констатировать, что для низкоуглеродистых трубных сталей взаимосвязь структуры и эффекта Баушингера изучена недостаточно полно.

В настоящей работе рассмотрены особенности проявления эффекта Баушингера в стали 06Г2ФБ, имеющей феррито-перлитную и феррито-бейнитную структуры. Подробная информация о режимах обработки стали, а также о ее структуре приведена в ранее опубликованной работе [4]. Напомним, что сталь 06Г2ФБ подвергалась нагреву до 1000 °С, обеспечивающему получение среднего размера аустенитного зерна 30 мкм, и последующему охлаждению со скоростями 1 и 35 °С/с. Охлаждение со скоростью 1 °С/с приводило к формированию структуры, содержащей 90 % полигонального феррита и 5 % вырожденного перлита. Кроме того, в структуре присутствовало неболь-

шое количество кристаллов игольчатого бейнита и островков МА-составляющей. При охлаждении со скоростью 35 °С/с преимущественно возникала структура игольчатого бейнита. Доля ферритной составляющей не превышала 10 %, а перлит в структуре отсутствовал.

Исследование проводилось на Gleeble 3800, позволяющим осуществлять одноосное растяжение и сжатие. Образцы имели диаметр рабочей части 6 мм и длину 12 мм. Предварительно было установлено, что при таких размерах рабочей части образца исключался его изгиб при сжатии. Деформацию контролировали измерителем поперечной деформации. Образцы подвергали нагружению, включающему растяжение и сжатие, которые выполнялись в разной последовательности. Деформация осуществлялась со скоростью 0,01 с<sup>-1</sup> и равнялась как при растяжении, так и сжатии 3 %. После окончания знакопеременного нагружения остаточная деформация образцов отсутствовала.

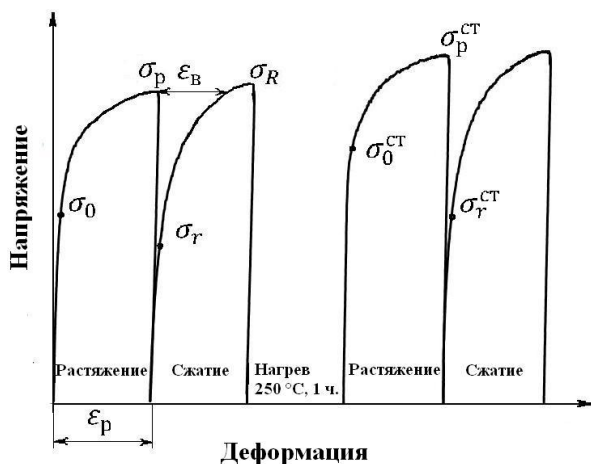


Рис. 1. Схема обработки, использованная для определения параметров эффекта Баушингера

Схема испытаний, при которой сначала проводилось растяжение, а затем сжатие, приведена на рис. 1. Кривая сжатия на этом рисунке перевернута на 180° относительно оси абсцисс. В схеме использованы следующие обозначения:

- $\sigma_0$  – начальный предел текучести ( $\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$ );
- $\sigma_p$  – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации;
- $\sigma_r$  – предел текучести при вторичной (обратной) деформации ( $\sigma_{0,2}$ );
- $\sigma_k$  – наибольшее напряжение, достигаемое при вторичной деформации;
- $\epsilon_p$  – деформация при предварительном нагружении;

$\epsilon_B$  – деформация Баушингера, деформация в обратном направлении, соответствующая точке обратного напряжения, равной максимальному напряжению при деформации  $\sigma_p$ .

Существует несколько параметров оценки эффекта Баушингера [5]. В работе использовали

параметры напряжения  $\beta_\sigma$  и деформации  $\beta_\epsilon$ . Эти параметры равны:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_p - |\sigma_r|}{\sigma_p};$$

$$\beta_\epsilon = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_p}.$$

Выяснялось, как циклическое нагружение в совокупности с низкотемпературным нагревом влияет на склонность стали 06Г2ФБ к деформационному старению и как при таком старении изменяется эффект Баушингера. Для этого образцы после знакопеременного нагружения подвергались согласно ГОСТ 7268–82 нагреву до 250 °С с выдержкой 1 ч. Затем определяли  $\Delta\sigma^{CT} = \sigma_0^{CT} - \sigma_0$ , где  $\sigma_0^{CT}$  – предел текучести стали при старении.

Для анализа деформационного упрочнения при растяжении и сжатии использовали уравнение  $S = k\epsilon^n$ , где  $S$  и  $\epsilon$  – истинные напряжение и деформация соответственно, а  $n$  – показатель деформационного упрочнения. Диаграммы нагружения перестраивали в логарифмических координатах и определяли  $n$ .

Вне зависимости от того, осуществлялось ли нагружение по схеме «растяжение + сжатие» или «сжатие + растяжение», на диаграммах преддеформации образцов с феррито-перлитной структурой наблюдается площадка текучести со слабо выраженным зубом. При обратной деформации она исчезает, а предел текучести заметно снижается, что является признаком появления эффекта Баушингера. Для феррито-бейнитной структуры характерен более высокий уровень предела текучести и отсутствие на кривых деформации площадки текучести. При обратной деформации для этой структуры наблюдается значительно большее снижение предела текучести, чем в случае феррито-перлитной структуры. Так если при феррито-бейнитной структуре разница между  $\sigma_0$  и  $\sigma_r$  составляла 145–148 МПа, то при феррито-перлитной – 69–72 МПа. Еще в большей мере изменяется разность между  $\sigma_p$  и  $\sigma_r$ : она равна для феррито-бейнитной структуры 331–363 МПа, а для феррито-перлитной – 129–132 МПа.

Рассматриваемые структуры имеют свои особенности деформационного упрочнения. Для феррито-перлитной структуры при преддеформации зависимость  $\ln S - \ln \epsilon$  описывается одной прямой (рис. 2). У образцов с феррито-бейнитной структурой на кривой  $\ln S - \ln \epsilon$  можно выделить два участка с разным  $n$ . Такой тип упрочнения при деформации характерен для низкоуглеродистых двухфазных сталей [6]. При обратной деформации для обоих видов структуры зависимость  $\ln S - \ln \epsilon$  описывается прямой с двумя участками. Коэффициенты деформационного упрочнения  $n$  на первом, более крутом, участке выше, чем на втором, причем они больше коэффициентов  $n$ , определенных при преддеформации. Таким образом, при обрат-

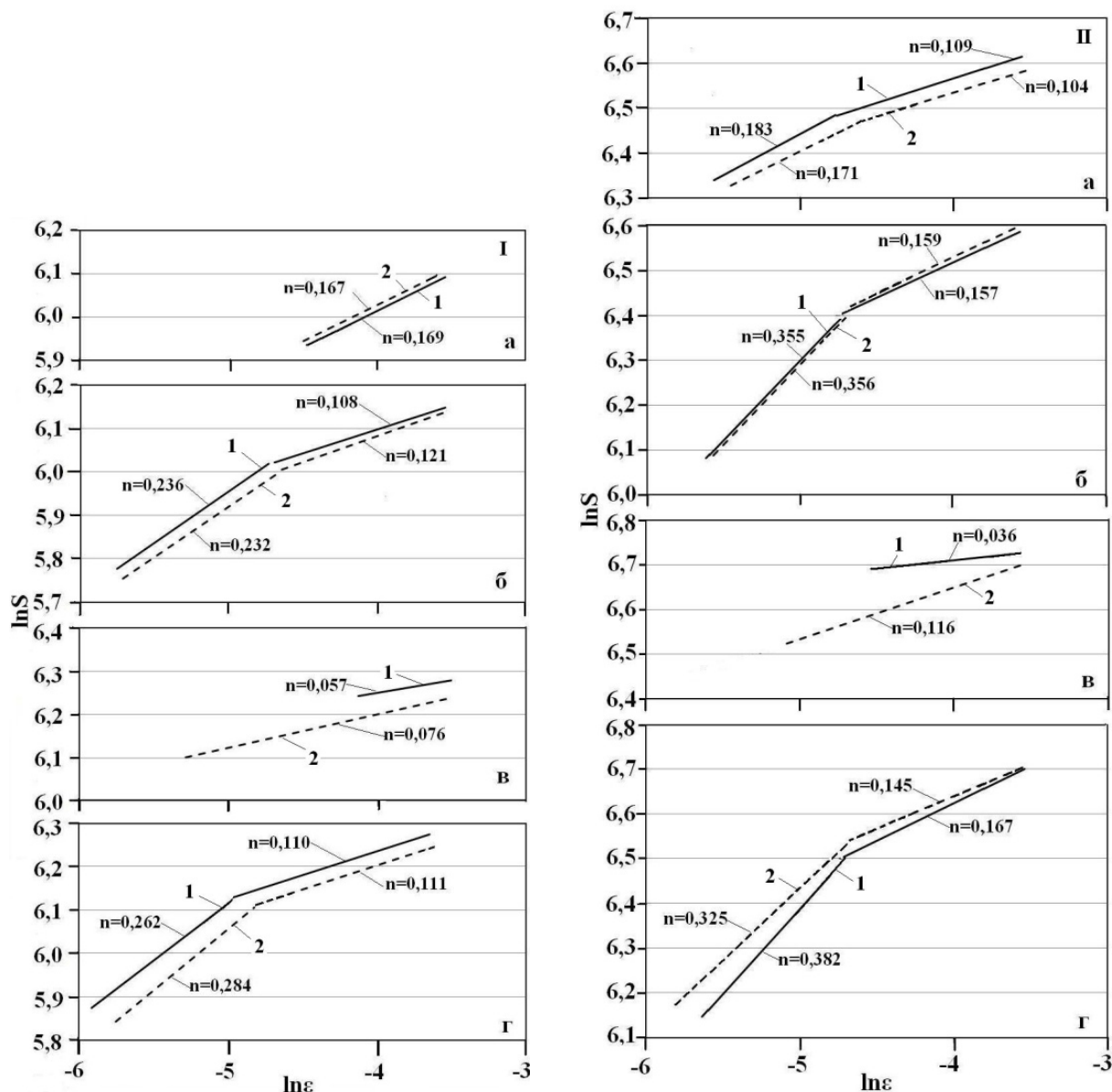


Рис. 2. Деформационное упрочнение стали 06Г2ФБ с феррито-перлитной (I) и феррито-бейнитной (II) структурой: а – преддеформация; б – обратная деформация; в – старение; г – знакопеременное нагружение в состаренном состоянии. Нагружение при исходной знакопеременной деформации по схеме «растяжение + сжатие» (1) и «сжатие + растяжение» (2)

ной деформации не только снижается предел текучести, но на ее начальной стадии имеет место высокая скорость деформационного упрочнения, что также следует связывать с проявлением эффекта Баушингера.

Параметры, оценивающие эффект Баушингера, приведены в таблице. Можно видеть, что для феррито-бейнитной и феррито-перлитной структуры наблюдается одна закономерность: параметры  $\beta_{\sigma}$  и  $\beta_{\epsilon}$ , также как  $\sigma_r$  и  $n$ , незначительно зависят от схемы нагружения. Совокупность полученных данных свидетельствует, что феррито-бейнитная структура по сравнению с феррито-перлитной обладает большей склонностью к проявлению эффекта Баушингера.

Ранее было установлено, что сталь 06Г2ФБ обладает достаточно высокой склонностью к деформационному старению. Предел текучести этой стали существенно возрастал при совмещении небольшой пластической деформации растяжением или прокаткой с нагревом на 250 °С [7]. Данные, полученные в настоящей работе, показывают, что деформационное старение происходит и тогда, когда перед нагревом сталь подвергается не только одинарной, но и знакопеременной деформации. Оно сопровождается не только увеличением предела текучести состаренной стали при растяжении. При нагружении перед старением по схеме «сжатие + растяжение» на кривых деформации образцов с феррито-перлитной структурой появляется

Характеристики стали 06Г2ФБ при циклическом нагружении

Свойства	Феррито-перлитная структура	Феррито-бейнитная структура
$\sigma_0$ , МПа	$\frac{385}{384}$	$\frac{578}{580}$
$\sigma_r$ , МПа	$\frac{313}{315}$	$\frac{430}{435}$
$\beta_\sigma$	$\frac{0,30}{0,29}$	$\frac{0,43}{0,45}$
$\beta_\varepsilon$	$\frac{0,54}{0,54}$	$\frac{0,74}{-}$
$\sigma_0^{ст}$ , МПа	$\frac{447}{521}$	$\frac{622}{808}$
$\Delta\sigma^{ст}$ , МПа	$\frac{62}{137}$	$\frac{44}{228}$
$\sigma_r^{ст}$ , МПа	$\frac{331}{363}$	$\frac{472}{474}$
$\beta_\sigma^{ст}$	$\frac{0,35}{0,32}$	$\frac{0,42}{0,43}$

Примечание. В числителе данные при нагружении по схеме «растяжение + сжатие», в знаменателе – «сжатие + растяжение».

площадка текучести. В этом случае одновременно с ростом предела текучести уменьшается скорость деформационного упрочнения и соответственно коэффициент  $n$  (см. рис. 2).

Величина упрочнения при деформационном старении зависит от условий проведения деформации перед нагревом. Если при осуществлении нагружения по схеме «растяжение + сжатие» склонность к деформационному старению существенно не зависит от исходной структуры, то при нагружении по схеме «сжатие + растяжение» она значительно выше у феррито-бейнитной структуры. В последнем случае достигается наибольший предел текучести и максимальные значения  $\Delta\sigma^{ст}$ . Отметим, что после использования обработки по режиму «сжатие + растяжение + нагрев» на 250 °С предел текучести в состаренном состоянии сопоставим с пределом текучести, который имеет сталь 06Г2ФБ после обработки, включающий однократное растяжение на 3 % и аналогичный нагрев.

Представлялось целесообразным выяснить, как изменяются свойства состаренной стали, если после растяжения на 3 % ее дополнительно подвергнуть сжатию с этой же степенью деформации. Установлено, что при сжатии предел текучести резко снизился. У образцов с феррито-перлитной структурой площадка текучести исчезла. Характер зависимости  $\ln S - \ln \varepsilon$  оказался таким же, как и в случае, когда сжатие после растяжения проводили в несостаренном состоянии. При этом для состаренного и несостаренного состояний коэффициенты  $n$  были сопоставимы по величине: их различие составляло 5–12 %.

Знакопеременное нагружение привело к тому, что состаренная сталь стала обладать высокой склонностью к проявлению эффекта Баушингера.

При этом состаренные и несостаренные образцы имели достаточно близкие значения  $\beta_\sigma$ .

Как известно, во время пластической деформации движущиеся дислокации взаимодействуют с различного рода препятствиями, предотвращающими их дальнейшее продвижение. В местах контакта дислокаций с препятствиями возникают поля напряжений, действующие в направлении, противоположном деформации. Если осуществить повторную деформацию, но противоположного знака, то эти обратные напряжения будут способствовать движению дислокаций в направлении этой деформации, что приведет к снижению предела текучести.

Препятствиями для движущихся дислокаций являются дислокации, присутствующие в металле в исходном состоянии. Поэтому если предварительной обработкой создана повышенная плотность дислокаций, то можно ожидать увеличение эффекта Баушингера. Тем не менее, при существенном увеличении исходной плотности дислокаций, например, за счет осуществления интенсивной пластической деформации, не исключено уменьшение эффекта Баушингера, что может быть связано со снижением числа мобильных дислокаций из-за образования ячеистой структуры. При анализе причин появления эффекта Баушингера следует также учитывать, что препятствием для движения дислокаций являются границы зерен и субзерен, а также границы кристаллов мартенсита и бейнита.

Другим важным фактором, который влияет на проявление эффекта Баушингера, является присутствие в материале выделившихся частиц. Характер взаимодействия движущихся дислокаций с частицами различен: может происходить как переполза-

ние частиц дислокациями, так и их огибание. Количество точек взаимодействия с дислокациями и способность к закреплению последних зависит от объемной доли частиц, их структуры, дисперсности, морфологии, химического состава и особенностей распределения в матрице.

Не исключено, что на проявление эффекта Баушингера определенное влияние оказывает неоднородность распределения пластической деформации, а следовательно, и остаточных напряжений между зернами.

Склонность к проявлению эффекта Баушингера зависит от фазового состава стали. В двухфазных сталях развитие релаксации остаточных напряжений в разных фазах может иметь свои особенности. Считается, что чем больше различие в пластичности фаз, тем больше и различие в протекании релаксации напряжений в этих фазах. Известно, что двухфазные феррито-мартенситные стали, имеющие существенно разную прочность и пластичность структурных составляющих, показывают большой эффект Баушингера [8].

Различие в склонности феррито-перлитной и феррито-бейнитных структур к проявлению эффекта Баушингера логично связать с разным количеством препятствий движению мобильных дислокаций в процессе нагружения. Большое количество таких препятствий следует ожидать у феррито-бейнитной структуры, так как бейнитная  $\alpha$ -фаза по сравнению с полигональным ферритом имеет значительно более высокую плотность дислокаций. Кроме того, эффективными препятствиями движению дислокаций должны быть и границы ее кристаллов, небольшие размеры которых предопределяют большую протяженность границ.

Менее ясна роль карбидов как препятствий движению дислокаций. Часть карбидов не растворяется при аустенизации. Во время выдержки при 1000 °С получает некоторое развитие коагуляция карбидных частиц, в результате чего они имеют достаточно крупные размеры и небольшую плотность выделений в объеме металла. Поэтому эти карбиды не должны оказывать существенного влияния на движение дислокаций. В случае диффузионного превращения переохлажденного аустенита основная часть углерода находится в карбидах перлитной составляющей. Перлит, присутствуя в структуре в виде небольших участков, расположенных относительно друг друга на весьма значительном расстоянии, не может эффективно тормозить движение мобильных дислокаций. При быстром охлаждении, при котором формируется феррито-бейнитная структура, процессы образования карбидной фазы затруднены. Что касается карбидов, которые все же успевают возникнуть при охлаждении, то местами их предпочтительного выделения являются границы кристаллов бейнитной  $\alpha$ -фазы. В связи с этим их влияние на эффект Баушингера трудно отделить от влияния непосредственно границ.

Из-за большого количества и относительно малой дисперсности МА-составляющая не должна играть существенной роли в появлении эффекта Баушингера, как при исходной феррито-перлитной, так и феррито-бейнитной структуры. При анализе причин появления эффекта Баушингера вряд ли следует уделять значительное внимание и присутствию в феррито-перлитной структуре единичных кристаллов бейнитной  $\alpha$ -фазы. Что касается феррито-бейнитной структуры, то нельзя исключать, что наличие ферритной составляющей может вызвать определенное перераспределение остаточных напряжений при нагружении и тем самым оказать влияние на эффект Баушингера.

Нагрев на 250 °С образцов, подвергнутых знакопеременной деформации, сопровождается процессами закрепления дислокационной структуры, что и приводит к росту предела текучести. Можно предположить, что при использованном режиме нагрева часть дислокаций оказалась незакрепленной или слабо закрепленной. В этом случае не исключено, что у образцов подвергнутых предварительному нагружению по схеме растяжение+сжатие при растяжении после старения выявляется склонность к проявлению эффекта Баушингера. Тогда с возникновением этого эффекта можно связать, тот факт, что состаренная сталь, подвергнутая предварительной деформации по схеме «растяжение+сжатие», имеет меньший предел текучести, чем при предварительной деформации по схеме «сжатие+растяжение».

Не вполне ясно, с чем связано резкое снижение предела текучести и появление значительного эффекта Баушингера, когда состаренную сталь после деформации растяжением подвергали сжатию. Возможно, что при растяжении формируется новая незакрепленная выделениями дислокационная структура, которая оказывается достаточно подвижной при приложении обратных напряжений.

### Выводы

1. При нагружении, проводимом по схеме «одноосное растяжение+сжатие», вне зависимости от последовательности приложения нагрузки, склонность низкоуглеродистой стали к появлению эффекта Баушингера при феррито-бейнитной структуре выше, чем при феррито-перлитной. Для обеих структур очередность осуществления растяжения и сжатия слабо влияет на параметры эффекта Баушингера.

2. Совмещение знакопеременного нагружения с последующим низкотемпературным нагревом приводит к деформационному старению стали 06Г2ФБ, сопровождающимся ростом определяемого при растяжении предела текучести. Наиболее значительные изменения этой характеристики происходят, когда нагружение перед провоцирующим нагревом осуществляется по схеме «сжатие+растяжение». В этом случае при наличии исходной феррито-бейнитной структуры при дефор-

максимальном старении достигается наибольший уровень предела текучести стали.

3. Знакопеременное нагружение, осуществляемое в состаренном состоянии, приводит к резкому снижению предела текучести и появлению эффекта Баушингера, который судя по величине  $\beta_{\sigma}$ , сопоставим с эффектом Баушингера, наблюдаемым до старения. Эффект Баушингера состаренной стали мало зависит от схемы нагружения до старения. Как и в несостаренном состоянии, он после провоцирующего нагрева проявляется в большей мере при феррито-бейнитной структуре.

#### Литература

1. Макклиток, Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443 с.

2. Сэйдж, А.М. Металлургический обзор высокопрочных низколегированных сталей труб и фитингов / А.М. Сэйдж // Сталь для газопроводных труб и фитингов. – М.: Металлургия, 1985. – С. 38–60.

3. Effect of reel-laying simulation on mechanical performance of flowlines / E. Anelli, M. Tivelli, A. Izquierdo, H. Quintanilla // International Pipeline

conference, September 25–29, 2006, Calgary, Alberta, Canada. – С. 1–10.

4. Деформационное старение низкоуглеродистой трубной стали / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, О.В. Варнак, А.О. Струин // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 129–133.

5. Lemoine, X. Bauschinger effect correspondence of experimental tests / X. Lemoine, A. Aouafi // International Journal of Material Forming. – 2008. – Vol. 1, no. 1. – P. 241–244.

6. Голованенко, С.А. Двухфазные низколегированные стали / С.А. Голованенко, Н.М. Фоништейн. – М.: Металлургия, 1986. – 207 с.

7. Влияние структуры на деформационное старение низкоуглеродистой стали / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, О.В. Варнак, А.Н. Мальцева // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 8. – С. 9–15.

8. Brandon, M.H. The influence of deformation-induced residual stresses on the post-forming tensile stress/strain behavior of dual-phase steels: doctoral dissertation: defense date 22.09.05; approval date 01.02.06 / Brandon Michael Hance. – University of Pittsburgh, 2005. – 206 с.

**Смирнов Михаил Анатольевич**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РосНИТИ), г. Челябинск; smirnov@rosniti.ru.

**Ахмедьянов Александр Маратович**, начальник лаборатории физического моделирования термомеханических процессов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; akhmedianovam@susu.ac.ru.

**Варнак Ольга Васильевна**, ведущий инженер, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РосНИТИ), г. Челябинск; varnakov@rosniti.ru.

**Мальцева Анна Николаевна**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией термической обработки, Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РосНИТИ), г. Челябинск; maltsevaan@rosniti.ru.

Поступила в редакцию 20 января 2015 г.

## THE BAUSCHINGER EFFECT IN LOW-CARBON STEEL

**M.A. Smirnov**, Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation, smirnov@rosniti.ru,

**A.M. Akhmed'yanov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, akhmedianovam@susu.ac.ru,

**O.V. Varnak**, Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation, varnakov@rosniti.ru,

**A.N. Mal'tseva**, Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation, maltsevaan@rosniti.ru

The Bauschinger effect may occur during pipe production and expansion as well as during flattening segments cut from pipes and used for the manufacture of full-size flat specimens for mechanical testing.

The research deals with the Bauschinger effect in low-carbon pipe steel with ferrite-pearlite and ferrite-bainite structures. The alternate loading is followed by low-temperature heating and influences steel strain aging thus changing the Bauschinger effect.

To investigate the Bauschinger effect the samples were subjected to loading including tension and compression which were carried out in different sequences. After alternating loading deformation of samples was absent.

It was established that not depending on the loading scheme the ferrite-bainite structure is more susceptible to the Bauschinger effect than the ferrite-pearlite structure. Alternating loading followed by low-temperature heating leads to strain aging of steel which is accompanied by the increase of yield strength. The Bauschinger effect after aging is comparable to the Bauschinger effect before aging. The hardening magnitude depends on the loading scheme before low-temperature heating. The tendency to strain aging according to the loading scheme “tension + compression” does not depend on the initial structure. Whereas, with a ferrite-bainite structure according to the loading scheme “compression + tension” the highest level of yield strength is achieved at strain aging. Alternating loading carried out after strain aging leads to a sharp decrease in the yield strength and the appearance of the Bauschinger effect. The Bauschinger effect does not depend on the loading scheme before provoking heating and is mainly manifested with the ferrite-bainite structure.

*Keywords:* low-carbon pipe steel; Bauschinger effect; strain aging; ferrite; bainite; mechanical properties.

### References

1. McClintock F.A., Argon A.S. *Mechanical Behavior of Materials*. Addison-Wesley Publ., 1966.
2. Sage A.M. A Review of the Physical Metallurgy of High Strength, Low Alloy Line Pipe and Pipe Fitting Steels. *Proceedings of the International Conference for Line Pipes and Pipe Fittings, London, 21–23 October 1981*. The Metals Society, 1981, pp. 39–50.
3. Anelli E., Tivelli M., Izquierdo A., Quintanilla H. Effect of Reel-Laying Simulation on Mechanical Performance of Flowlines. *ASME International Pipeline Conference, September 25–29, 2006, Calgary, Alberta, Canada*. Vol. 3, part A. ASME Publ., 2007, pp. 417–426.
4. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Varnak O.V., Struin A.O. [Strain Aging of Low-Carbon Pipeline Steel]. *Bull. of the South Ural St. Univ. Ser. “Metallurgy”*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 129–133. (in Russ.)
5. Lemoine X., Aouafi A. Bauschinger Effect Correspondence of Experimental Tests. *International Journal of Material Forming*, 2008, vol. 1, no. 1 suppl., pp. 241–244. DOI: 10.1007/s12289-008-0357-9
6. Golovanenko S.A., Fonshteyn N.M. *Dvukhfaznye nizkolegirovannye stali* [Dual-Phase Low-Alloy Steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 207 p.
7. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Varnak O.V., Mal'tseva A.N. [Effect of Structure on Strain Aging of Low-Carbon Steel]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2014, no. 8, pp. 9–15. (in Russ.)
8. Brandon M.H. *The Influence of Deformation-Induced Residual Stresses on the Post-Forming Tensile Stress/Strain Behavior of Dual-Phase Steels*. Doct. Diss. Pittsburgh, 2005. 206 p.

*Received 20 January 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Склонность низкоуглеродистой трубной стали к проявлению эффекта Баушингера / М.А. Смирнов, А.М. Ахмедьянов, О.В. Варнак, А.Н. Мальцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 26–32.

### REFERENCE TO ARTICLE

Smirnov M.A., Akhmed'yanov A.M., Varnak O.V., Mal'tseva A.N. The Bauschinger Effect in Low-Carbon Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 26–32. (in Russ.)