

Список литературы

1. Перспективный метод экспресс-контроля Al-сплавов / Богданова Т.А., Мельников С.В., Довженко Н.Н., Падалка В.А., Орелкина Т.А., Гильманшина Т.Р. // *Металлургия машиностроения*. 2014. № 2. С. 12–15.
2. Аристова Н.А., Колобнев И.Ф. *Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов*. М.: *Металлургия*, 1977. 144 с.
3. Влияние температуры нагрева при покраске на структуру и свойства дисков автомобильных колес из сплава АК12 / Богданова Т.А., Меркулова Г.А., Дубинин П.С., Бурлылова Т.В. // *Цветные металлы 2013: сб. докладов пятого междунар. конгресса* (Красноярск, 4–6 сент. 2013 г.). Красноярск, 2013. С. 535–539.
4. *Алюминий: свойства и физическое металловедение: справ. изд.: пер. с англ.* / под ред. Хэтча Дж. Е. М.: *Металлургия*, 1989. 422 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES AND APPLICATION OF A DECORATIVE PROTECTIVE COATING ON MECHANICAL PROPERTIES AND THE STRUCTURE OF AUTOMOBILE WHEEL DISKS OF AK7PCH ALLOY

Bogdanova Tatyana Alexandrovna – Head of the Metallurgical Department, LLC K&K, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: bat@kandk.ru.

Dovzhenko Nikolay Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Oil and Gas Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru

Merkulova Galina Alexandrovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gam1602@mail.ru.

Gilmanshina Tatyana Rinatovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gtr1977@mail.ru

Latypov Farit Rafgatovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University, Bashkortostan. E-mail: vei10@yandex.ru.

References

- Abstract.** The influence of modes of hardening and artificial ageing, application of a decorative protective coating on mechanical properties and the structure of automobile wheel disks of AK7pch alloy is studied. It is established that formation of a finely dispersed structure during low-pressure casting guarantees higher mechanical properties (rupture strength and percentage elongation) of wheels after heat treatment.
- Keywords:** aluminum alloy, low-pressure casting, heat treatment, decorative protective coating, mechanical properties, microstructure.
1. Bogdanova T.A., Melnikov S.V., Dovzhenko N.N., Padalka V.A., Orelkina T.A., Gilmanshina T.R. Prospective method of Al-alloys express-control. *Perspektivnyj metod ehkspress-kontrolya Al-splavov* [Metallurgy of mechanical process engineering]. 2014, no. 2, pp. 12-15.
 2. Aristova N.A., Kolobnev I.F. *Termicheskaya obrabotka litejnykh alyuminievykh splavov* [Cast aluminium alloys heat treatment]. Moscow: Metallugiya, 1977, 144 p.
 3. Bogdanova T.A., Merkulova G.A., Dubinin P.S., Burylova T.V. The influence of heating temperature during coating process on properties and structure of wheel disks made of AK12 alloy. *Tsvetnye metally 2013* [Non-ferrous metals 2013]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 535-539.
 4. *Aluminium: properties and physical metallurgy. Handbook*. Translated from English. Ed. by Hatch J.E. Moscow: Metallugiya, 1989, 422 p.

УДК 669.017:620.186

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ ТРУБНОЙ СТАЛИ С ФЕРРИТОБЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Варнак О.В.¹, Ильин С.И.², Пышминцев И.Ю.¹, Смирнов М.А.², Тетеркин С.Н.³

¹ ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск, Россия

² ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия

³ ОАО «Челябинский металлургический комбинат», Россия

Аннотация. Установлено, что сталь 06Г2ФБ с ферритобейнитной структурой обладает заметной склонностью к деформационному старению. Развитие деформационного старения сопровождается значительным ростом прочности, заметным снижением равномерного относительного удлинения, скорости деформационного упрочнения и повышением температуры вязкохрупкого перехода.

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

Введение

При изготовлении труб высокого класса прочности для магистральных трубопроводов (Х70, Х80), как правило, применяют низкоуглеродистые стали с ферритобейнитной структурой. При использовании в районах повышенной сейсмической активности и на периодически промерзающих грунтах к ним предъявляют повышенные требования. Они должны наряду с высокой прочностью обладать повышенной деформационной способностью, высокой вязкостью при пониженных температурах и высоким сопротивлением к деформационному старению. В настоящей работе проведена оценка склонности к деформационному старению трубной низкоуглеродистой стали 06Г2ФБ с ферритобейнитной структурой.

Методы исследования

Исследовали сталь следующего химического состава: 0,06%С, 1,65% Мп, 0,42%(Cr+Ni+Cu), 0,02%V, 0,016% Nb и 0,0044% N. Заготовки сечением 12,5x12,5 мм вырезали из трубы вдоль направления прокатки горячекатаного листа. Их нагревали до 1000°C, что обеспечивает получение аустенитного зерна со средним размером 30 мкм. Заготовки охлаждали со средней скоростью 35 град/с в интервале 800–300°C. Структуру стали изучали с использованием оптической и электронной сканирующей микроскопии. Испытание на статическое растяжение проводили на пятикратных образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Ударную вязкость определяли на образцах размерами 10x10x55 мм с U-образным надрезом. Такой тип надреза считается наиболее оптимальным при изучении склонности стали к деформационному старению [1].

Склонность к деформационному старению оценивали после холодной пластической деформации, осуществляемой растяжением или прокаткой, и последующего одночасового нагрева на 250°C, рекомендованного ГОСТ 7268-82. Вырезанные из заготовок разрывные образцы подвергали растяжению на 3% со скоростью 10^{-3} с^{-1} . Прокатку осуществляли на лабораторном стане со скоростью 1 с^{-1} с обжатиями 5 и 10%. В

этом случае деформации подвергали непосредственно заготовки.

После охлаждения со скоростью 35 град/с в структуре стали 06Г2ФБ содержится 90% бейнитной составляющей и 10% феррита; образование перлита не обнаружено. При бейнитном превращении формируется в основном игольчатый бейнит, на границах реек которого присутствуют «островки» МА-составляющей, имеющие преимущественно вытянутую форму. При выбранном режиме охлаждения наряду с игольчатым бейнитом образуется небольшое количество реечного и глобулярного бейнита (до 17%). Реечный бейнит встречается в виде пакетов, состоящих из реек, более тонких, чем рейки игольчатого бейнита. На их границах наблюдаются дисперсные «выделения», которые могут быть как прослойками аустенита, так и карбидами [2, 3]. Глобулярный бейнит присутствует в виде небольших участков равноосной формы. Ферритная составляющая располагается в виде цепочек равноосных зерен (полигональный феррит) или прослоек (аллотриоморфный феррит).

Несмотря на то, что исследованная сталь не подвергалась контролируемой прокатке, тем не менее после выбранного режима обработки уровень ее пределов текучести и прочности соответствовал классу прочности Х80; при этом соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ было сравнительно небольшим (см. таблицу). На диаграммах растяжения зуб и площадка текучести отсутствовали. Для стали были характерны высокие относительное сужение и $KCU^{+20^\circ C}$. Весьма низкой была температура вязко-хрупкого перехода T_{50} , соответствующая наличию в изломе 50% вязкой составляющей. Общее и равномерное относительное удлинения имели невысокие значения.

Механические свойства стали 06Г2ФБ

Обработка	$\sigma_{0,2}$ (σ_T)	σ_B	δ	$\delta_{равн}$	ψ	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$KCU^{+20^\circ C}$	$KCU^{-60^\circ C}$	C+20	C-60	T_{50}
	МПа		%				Дж/см ²		%		°C
Исходное состояние	568	765	18,8	7,2	82	0,74	333	349	–	–	–110
Растяжение 3%+250°C, 1 ч	(821)	835	16,5	5,0	79	0,98	–	–	–	–	–
Прокатка 5%+250°C, 1 ч	838	893	15,5	5,8	79	0,94	311	242	–	–	–
Прокатка 10%+250°C, 1 ч	992	1011	12,8	2,3	75	0,99	280	70	7	33	–30

Деформационное старение при обработке, включающей холодную пластическую деформацию и нагрев на 250°C, сопровождается ростом прочности и снижением пластичности. О склонности к деформационному старению, в случае использования при охрупчивающей обработке небольшой деформации растяжением (не более нескольких процентов), часто судят по разности $\Delta\sigma$ между пределом текучести после старения и напряжением, соответствующим предшествующей деформации [4, 5]. По мнению авторов работы [6], свойства после деформационного старения целесообразно сравнивать не только с деформированным состоянием, но и с исходным, так как в реальных конструкциях воздействия наклепа и старения совмещено.

Для стали 06Г2ФБ, деформированной перед нагревом на 250°C растяжением на 3%, величина $\Delta\sigma$ равнялась 72 МПа, причем после охрупчивающей обработки на диаграмме растяжения появилась площадка текучести длиной 2,8%. Значительно большее изменение прочности при деформационном старении наблюдается, если сравнивать свойства с исходным состоянием. В этом случае величина прироста предела текучести составляет 253 МПа. По сравнению с исходным состоянием после деформационного старения имеет место как рост предела прочности, так и соотношения $\sigma_{0,2}/\sigma_b$. Наблюдаемое упрочнение сопровождалось ощутимым снижением относительного удлинения, как общего, так и равномерного.

Существенное повышение прочности при деформационном старении наблюдается при деформации прокаткой, причем эффект упрочнения возрастает с увеличением степени обжатия. Прирост предела текучести при проведении перед нагревом на 250°C прокатки на 5% составил 271 МПа, а при прокатке на 10% – 424 МПа. Как и в случае растяжения, при использовании прокатки происходит значительный рост σ_b и соотношения $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, а также снижается относительное удлинение.

Чувствительной характеристикой к деформационному старению является скорость деформационного упрочнения $dS/d\varepsilon$, имеющая размерность напряжения [7]. Ее определяют после перестройки диаграммы растяжения в координатах истинные напряжения S и деформация ε . Из полученных данных следует, что при деформационном старении стали 06Г2ФБ

величина $dS/d\varepsilon$ уменьшается и, особенно существенно, когда прокатка проводилась с обжатием 10% (рис. 1).

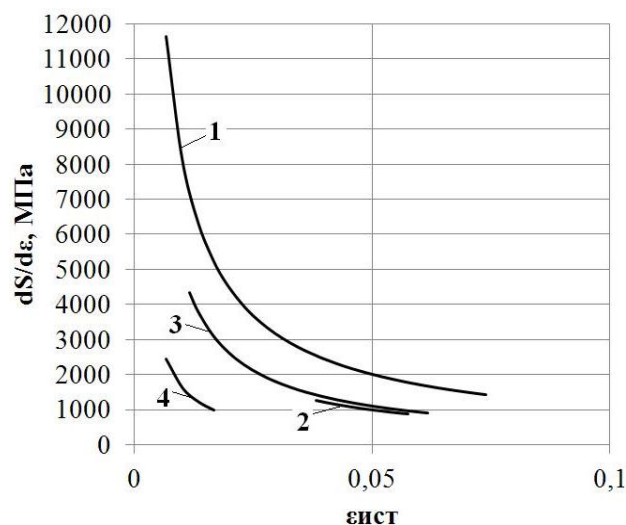


Рис. 1. Деформационное упрочнение стали с ферритобейнитной структурой:

- 1 – исходное состояние,
- 2 – растяжение 3% + 250°C, 1 ч;
- 3 – прокатка на 5% + 250°C, 1 ч;
- 4 – 10% + 250°C, 1 ч

Деформационное старение весьма незначительно снизило ударную вязкость при комнатной температуре испытания. Такому изменению $KCU^{+20°C}$ соответствует небольшая величина показателя склонности к деформационному старению S , равного, согласно ГОСТ 7268-82, отношению величины изменения ударной вязкости при старении к исходной ударной вязкости, выраженной в процентах (см. таблицу). В большей мере деформационное старение оказывает влияние на ударную вязкость при отрицательных температурах (рис. 2). После охрупчивающей обработки, включающей прокатку на 10%, серийная кривая ударной вязкости и соответственно T_{50} ощутимо сместились к более высоким температурам. Поэтому показатель S при отрицательных температурах испытания после деформационного старения становится значительно больше, чем при 20°C. Деформационное старение принципиально не изменяет зависимость характера разрушения от температуры испытания. В температурном интервале вязкохрупкого перехода происходит постепенная замена транскристаллитного вязкого разрушения транскристаллитным хрупким сколом.

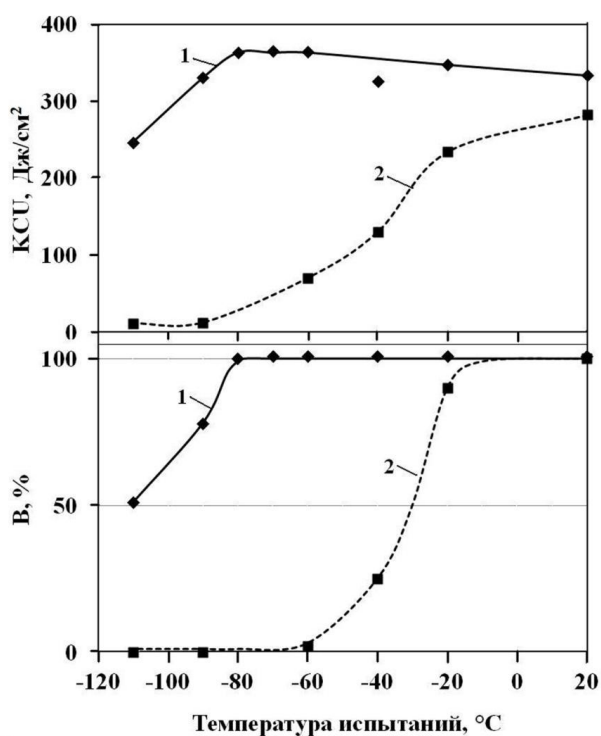


Рис. 2. Серийные кривые ударной вязкости и доля вязкой составляющей в изломе (В) стали 06Г2ФБ: 1 – исходная структура; 2 – деформация прокаткой на 10%+нагрев 250°C, 1 ч

Таким образом, совокупность экспериментальных данных свидетельствует о том, что при наличии ферритобейнитной структуры сталь 06Г2ФБ обладает заметной склонностью к деформационному старению. Подчеркнем, что такой эффект наблюдается, несмотря на относительно низкую температуру аустенитизации, при которой часть углерода оказывается связанной в карбиды и не перешла в твердый раствор.

Деформационное старение обусловлено развитием процессов взаимодействия растворенных в твердом растворе атомов углерода и азота с дислокациями. На дислокациях могут возникать атмосферы или сегрегации атомов внедрения, либо выделяться дисперсные карбиды (карбонитриды). Подвижность дислокаций снижается, затрудняется развитие деформации, уменьшается возможность релаксации пиков напряжений. При этом растет прочность, снижается пластичность и сопротивление хрупким разрушениям.

Низкое содержание азота позволяет считать, что при рассмотрении деформационного старения стали 06Г2ФБ следует учитывать, в основном, поведение в твердом растворе углерода. Быстрое охлаждение из аустенитной области должно способствовать созданию повышенной

концентрации углерода в основной структурной составляющей – игольчатом бейните. В структуре стали присутствуют «островки» МА-составляющей, для которых характерно высокое содержание углерода. Но количество этой структурной составляющей невелико. В связи с этим можно предполагать, что в бейнитной α -фазе содержится достаточное количество свободных атомов углерода, которые способны блокировать движение дислокаций.

Бейнитная α -фаза характеризуется наличием высокой плотности дислокаций. Соответственно пути дрейфа атомов углерода к дефектам кристаллического строения могут быть достаточно короткими. Этот фактор также должен способствовать развитию деформационного старения.

Заключение

1. При наличии ферритобейнитной структуры, основной структурной составляющей которой является игольчатый бейнит, низкоуглеродистая сталь 06Г2ФБ обладает достаточно высокой склонностью к деформационному старению. Такая закономерность хорошо выявляется вне зависимости от того, осуществлялась ли перед охрупчивающим нагревом деформация растяжением или прокаткой.

2. При развитии деформационного старения имеет место значительный рост пределов текучести и прочности стали 06Г2ФБ, снижение ее равномерного относительного удлинения, скорости деформационного упрочнения и повышение температуры вязко-хрупкого перехода.

Список литературы

1. Одесский П.Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций // Заводская лаборатория. 2003. Т. 6. №10. С. 41–49.
2. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Борякова А.Н. К вопросу о классификации микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей // Металлург. 2010. №7. С. 45–51.
3. Особенности структуры бейнита в низкоуглеродистых свариваемых сталях после термомеханической обработки / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // Вопросы материаловедения. 2009. №3. С. 26–38.
4. Деформационное старение и свойства низколегированных трубных сталей / А.Р. Мишетьян, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2011. №2. С. 12–19.
5. Гуль Ю.П. Влияние углерода и азота на упрочнение и охрупчивание при старении малоуглеродистой стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1975. №7. С. 8–12.
6. Бабиц В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320 с.
7. Голованенко С.А., Фонштейн Н.М. Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986. 207 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STRAIN AGING OF PIPE STEEL WITH THE FERRITE-BAINITE STRUCTURE

Varnak Olga Vasilievna – Lead Engineer, the Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia. E-mail: mushina@rosniti.ru

Ilyin Sergey Ivanovich – Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Pyshmintsev Igor Yurievich – D.Sc. (Eng), General Director, the Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries Open Joint Stock Company, Chelyabinsk, Russia.

Smirnov Mikhail Anatolievich – D.Sc. (Eng), Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Teterkin Sergey Nikolaevich – Shift Foreman, OJSC Mechel, Chelyabinsk, Russia.

Abstract. It is established that steel 06G2FB with the ferrite-bainite structure tends to strain aging to a noticeable extent. Development of strain aging is accompanied by a significant growth of the strength, a marked decrease in uniform relative elongation, speed of deformation hardening and increase in the temperature of the ductile-brittle transition.

Keywords: low-carbon pipe steel, strain aging, ferrite, bainite, mechanical properties.

References

1. Odessky P.D. About degradation of properties of steels for metal constructions. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory]. 2003, vol. 6, no. 10, pp. 41–49.
2. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Boryakova A.N. Revisiting the classification of low-carbon pipe steel microstructures. *Metallurg* [Metallurgist]. 2010, no. 7, pp. 45–51.
3. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Kruglova A.A., Khlusova E.I., Orlov V.V. Features of the bainite structure in low-carbon welded pipe steels after thermomechanical treatment. *Voprosy materialovedeniya* [Issues of materials science]. 2009, no. 3, pp. 26–38.
4. Mishetyan A.R., Filippov G.A., Morozov Yu.D., Chevskaya O.N. Strain aging and properties of low-alloyed pipe steels. *Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya* [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2011, no. 2, pp. 12–19.
5. Gul Yu.P. Influence of carbon and nitrogen on hardening and brittle behavior at aging of low-carbon steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 1975, no 7, pp. 8–12.
6. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.E. *Deformatsionnoe starenie stali* [The strain aging of steel]. Moscow: Metallurgy, 1972, 320 p.
7. Golovanenko S.A., Fonshtein N.M. *Dvukhfaznye nizkolegirovannye stali* [Dual-phase low-alloyed steels]. Moscow: Metallurgy, 1986, 207 p.