

**О.Р. ПРУДНИКОВА (ЗАО «БелТЭН»),
Э.Д. ЩЕРБАКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

**ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ, ПЕРЕСТАРИВАНИЕ
И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ
ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ
ИЗ СТАЛЕЙ 08Ю И 08пс**

В каждом конкретном случае необходимые для тонкостенных электросварных труб (ТЭТ) свойства определяются технологией их переработки, то есть операциями, которым подвергается труба при изготовлении изделий из нее.

Различные условия, в которых работают трубы и изделия из них, определяют использование сталей разных марок с различным уровнем свойств. Анализ структуры себестоимости показывает, что стоимость исходного металла составляет 75–80 % от себестоимости готовых труб. Это обстоятельство обуславливает повышенные требования к исходному материалу. С одной стороны, металл для труб должен быть, по возможности, более дешевым, а, с другой стороны, качество этого металла должно быть достаточно высоким, обеспечивающим минимальную отбраковку труб и высокий выход годного.

Тонкостенные электросварные трубы круглого сечения выпускаются в основном по следующим стандартам: ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10707-80.

ГОСТ 10705-80 распространяется на стальные электросварные тонкостенные трубы диаметром от 10 до 530 мм из углеродистой и низколегированной стали. Согласно этому стандарту трубы изготавливают из спокойной, полуспокойной и кипящей стали марок Ст1, Ст2, Ст3, Ст4 по ГОСТ 380-2005 (категор. 4 по ГОСТ 16523-97 и категорий 2–5 по ГОСТ 14637-89); спокойной, полуспокойной и кипящей стали марок 08, 10, 15, 20 по ГОСТ 1050-88; стали марки 08Ю по ГОСТ 9045-93.

Для изготовления труб, к которым предъявляются повышенные требования по пластичности, используют стали с пониженным содержанием примесей внедрения, раскисленные алюминием – 08Ю и 08пс.

Эти материалы имеют ряд особенностей:

- низкое содержание примесей внедрения – азота и углерода (таблица 1);
- высокий уровень пластичности (таблица 2);
- анизотропия свойств из-за текстуры прокатки;
- склонность металла к деформационному старению (в некоторых случаях).

Все эти особенности связаны со сложным и многоэтапным процессом изготовления холоднокатаного проката и описаны во многих работах [1–5].

Таблица 1 – Химический состав стали (выборочно) согласно сертификатам качества завода-изготовителя (Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК))

Марка стали	Категория вытяжки	ГОСТ на х/с	Массовая доля элементов, %						
			C	Mn	S	P	Si	Al	N ₂
			не более						
08Ю	ВГ	9045-93	0,06	0,23	0,018	0,015	0,03	0,047	0,004
	СВ	9045-93	0,04	0,18	0,02	0,011	0,01	0,04	0,004
	ОСВ	9045-93	0,03	0,24	0,018	0,010	0,01	0,036	–
08пс	Г	1050-88	0,06	0,39	0,015	0,008	0,08	0,033	0,005

Таблица 2 – Механические свойства холоднокатаного проката (выборочно) согласно сертификатам качества завода изготовителя

Марка стали	Категория вытяжки по ГОСТ	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Твердость HRT-30	Глубина сферической лунки, мм
0,8Ю	ВГ	320	–	38	–	10,4
	СВ	285	170	42	39	11,1

	ОСВ	305	180	41	41	11,4
08пс	Г	335	–	37	–	–

Трубы изготавливают термически обработанными (по всему объему трубы или по сварному соединению), горячередацированными и без термической обработки. Механические свойства основного металла термически обработанных и горячередацированных труб из углеродистых сталей должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства основного металла термически обработанных труб по ГОСТ 10705-80

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	
			не менее	
08Ю	255	174	30	
08пс	314	196	25	

Механические свойства основного металла труб диаметром от 10 до 60 мм включительно без термической обработки и с термической обработкой сварного соединения должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства основного металла труб диаметром от 10 до 60 мм без термической обработки и с термической обработкой сварного шва по ГОСТ 10705-80

Марка стали	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ² , при наружном диаметре труб D , мм		Предел текучести, σ_t , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %, при толщине стенки, мм	
	от 10 до 19	св. 19 до 60		более 0,06D	0,06D и менее
	не менее				
08Ю, 08пс	314	294	176	7	16

Увеличение наружного диаметра труб без термической обработки при раздате должно составлять не менее 6 %, а термически обработанных труб – не менее 12 %. Из таблиц видно, что указан нижний предел показателей прочности и пластичности. Свойства каждой конкретной партии труб зависят от ряда факторов:

- исходного уровня механических свойств холоднокатаного металла;
- стабильности свойств холоднокатаного металла;
- степени деформации металла при изготовлении трубы.

Величина относительного удлинения и глубина сферической лунки (показатели, характеризующие пластичность) проката категории вытяжки ВГ (из стали 08пс и 08кп, 08Ю), изготавливаемого в дрессированном состоянии, гарантируется изготовителем в течение 10 суток с момента отгрузки. Для проката категорий ВОСВ, ВОСВ-Т, ОСВ, СВ (из стали 08Ю) такого ограничения гарантийных обязательств нет.

Изменение пластичности связано с проявлением деформационного старения. Деформационным старением принято называть изменение свойств металла, происходящее во времени после холодной или «теплой» пластической деформации. Наиболее важными следствиями деформационного старения стали являются эффекты упрочнения и охрупчивания.

Изменение свойств стали, характерное для деформационного старения, происходит только в том случае [6], если:

- 1) концентрация примесных атомов внедрения (углерода и азота), которые могут эффективно взаимодействовать с дислокациями, превышает 0,0001 % (по массе);
- 2) примесные атомы внедрения находятся в пересыщенном твердом растворе;
- 3) в металл деформацией введено определенное количество «свежих» дислокаций;
- 4) есть достаточное количество времени для закрепления дислокаций атомами внедрения (или низкотемпературный нагрев).

Другими словами, сталь 08кп всегда склонна к деформационному старению, сталь 08Ю категорий вытяжки ВОСВ, ВОСВ-Т, ОСВ, СВ к старению не склонна, а сталь 08Ю категории вытяжки ВГ и 08пс категории вытяжки ВГ и Г могут в некоторых случаях могут быть склонны к старению. Если деформационное старение не допу-

стимо, следует отказаться от использования проката из сталей категории вытяжки ВГ, Г (марок 08пс, 08кп, 08Ю). Использование сталей этой категории в наиболее ответственных изделиях может привести к снижению технологической пластичности в процессе изготовления изделий или конструктивной прочности и надежности при их эксплуатации. Таким образом, для металла категории ВГ и Г при входном контроле желательно проводить испытания на склонность к деформационному старению. Для этого следует создать условия, при которых деформационное старение обязательно проявится: деформация и последующий нагрев.

Для ленты (холоднокатаного проката) механическим испытанием, которое выявляет протекание в металле деформационного старения, является испытание на растяжение по ГОСТ 11701-84. Характерным признаком протекания старения является появление площадки текучести на диаграмме усилие-деформация. Ее появление означает, что какая-то часть дислокаций закреплена сегрегациями атомов внедрения. Растяжение до наступления площадки текучести объясняется движением слабо закрепленных дислокаций. Но при взаимоторможении перемещающихся дислокаций наступает момент, когда увеличение нагрузки не приводит к деформации, поскольку часть дислокаций тормозится друг другом, а часть – закреплена атомами. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к вырыванию дислокаций из закрепления и дальнейшей деформации за счет перемещения этих дислокация. Наличие сегрегаций атомов внедрения сильно снижает общий уровень пластичности стали [6].

Из вышесказанного следует, что для обнаружения склонности к деформационному старению холоднокатаного проката необходимо при входном контроле испытать ленту на растяжение в исходном состоянии, а затем (на других аналогичных образцах) подвергнуть ее деформации растяжением на 10 % и нагреву (при 200–250 °С в течение 20–30 мин). Температурно-временной режим испытаний может отличаться от приведенного выше. Например, нагрев можно проводить в кипящей воде в течение 10–15 мин, затем также испытать на растяжение.

В ходе исследований было обнаружено, что склонная к деформационному старению лента имела в исходном состоянии зуб текучести. После деформации и нагрева наблюдался прирост прочности

и падение пластичности, как показано на рисунках 1 и 2. Диапазон изменения свойств может отличаться для различных партий металла.

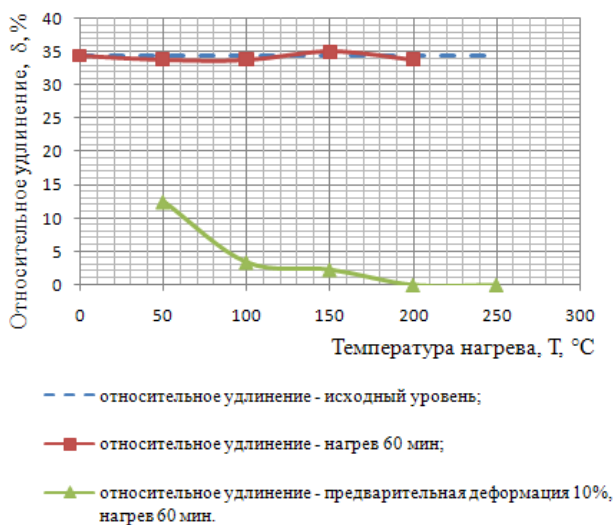


Рисунок 1 – Влияние нагрева на пластичность холоднокатаной ленты толщиной 1,0 мм из стали 08Ю

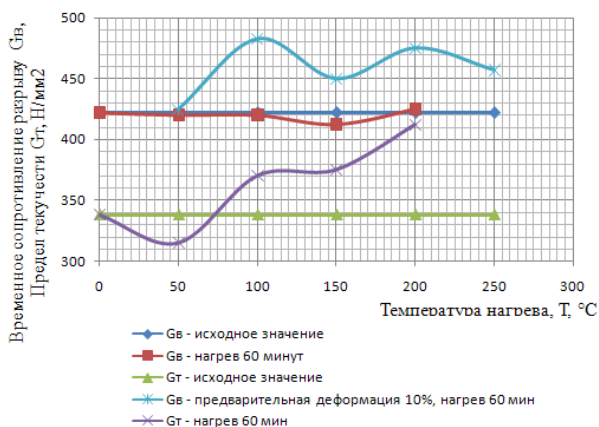


Рисунок 2 – Влияние нагрева на прочность холоднокатаной ленты толщиной 1,0 мм из стали 08Ю

Аналогично можно проверять и склонность к старению уже готовых ТЭТ. Испытания на разрыв в этом случае проводят по ГОСТ 10006-80. Для труб еще одним испытанием, выявляющим склонность металла труб к старению, является испытание на раздачу по ГОСТ 8694-75 на оправке с конусностью 30°. В ходе исследований было обнаружено, что раздача труб в результате старения также уменьшается, как видно из рисунка 3.

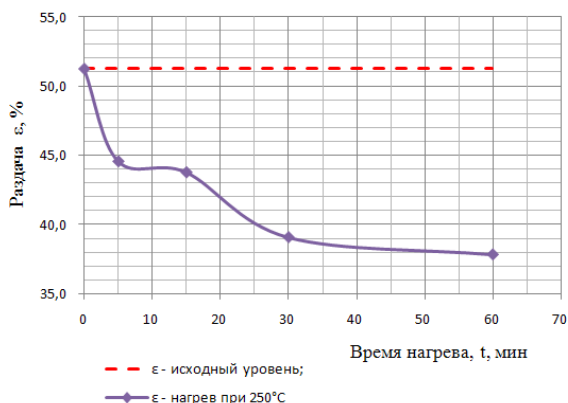


Рисунок 3 – Изменение величины раздачи трубы 16×0,8 мм из стали 08Ю при нагреве на 250 °С

Деформационное старение можно спровоцировать в процессе переработки труб, например, нагревом в процесс мойки заготовок в горячей воде. При нагреве в жидкой среде достаточно небольшого интервала времени для закрепления дислокаций, полученных в ходе изготовления трубы выделившимися атомами внедрения.

В ходе исследований было обнаружено, что восстановить исходный уровень механических и технологических свойств ТЭТ можно, проведя операцию перестаривания – кратковременный нагрев до температуры ~ 400 °С, вызывающий выделение карбидов, нитридов и карбонитридов из твердого раствора. Выделение карбидов и нитридов при перестаривании приводит к «освобождению» дислокаций, увеличению количества систем скольжения, т.е. к повышению пластичности, как показано на рисунках 4 и 5. Операцию перестаривания применяют на металлургических заводах для предотвращения старения холоднокатаного проката, отжиг которого прово-

дился в агрегатах непрерывного отжига (АНО), а не в колпаковых печах [1].

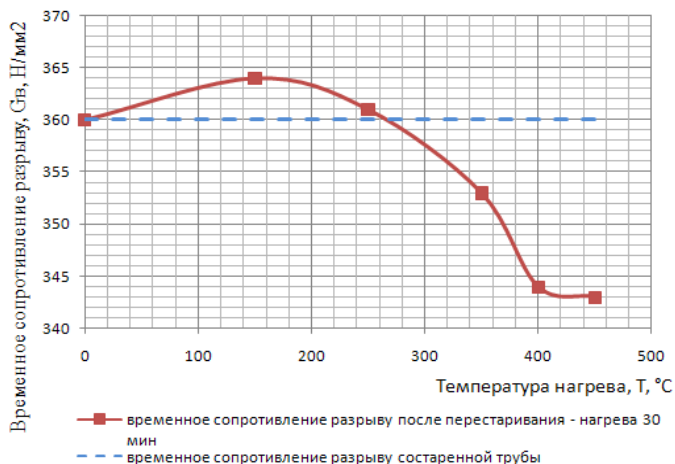


Рисунок 4 – Влияние перестаривания на прочность предварительно состаренных (нагрев в воде $80\text{ }^\circ\text{C}$, 15 мин) образцов трубы $16\times 0,8$ мм из стали 08Ю

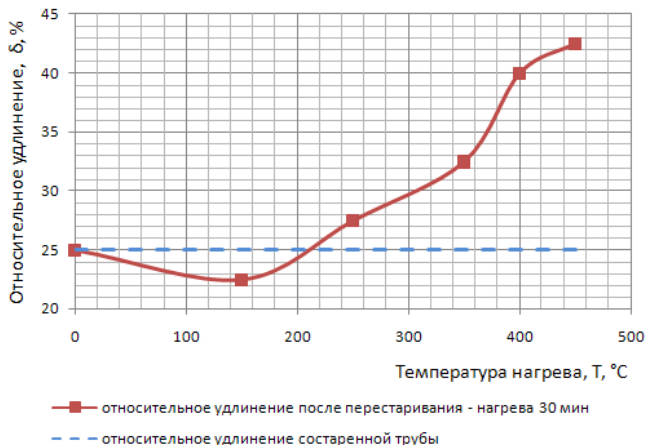


Рисунок 5 – Влияние перестаривания на прочность предварительно состаренных (нагрев в воде $80\text{ }^\circ\text{C}$, 15 мин) образцов трубы $16\times 0,8$ мм из стали 08Ю

Кроме свойств исходного материала, на прочность и пластичность ТЭТ влияет непосредственно схема производства. Современ-

ные трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА) содержат в своем составе линии подготовки ленты (размотка, правка, очистка и т.д.), формовки трубной заготовки, ее сварки, калибровки (редуцирования), резки труб. В формовочном стане валки, радиус кривизны которых непрерывно уменьшается, сворачивают плоскую ленту в круглую заготовку. Затем следует сварка заготовки. Окончательный геометрический размер труб обычно получают в непрерывных калибровочных станах (вариант № 1) или в редуционных станах (вариант № 2) [7]. При первой схеме производства в качестве исходного материала используют рулоны ленты (штрипс) с различными размерами по ширине и толщине для каждого размера труб. В этом случае степень деформации металла труб не высока, поэтому удается получить трубы с высокими пластическими свойствами даже без дополнительного отжига. На агрегатах, работающих по второму варианту, применяются всего два-три размера ленты, из которой формируют и сваривают трубу с большим диаметром, а после сварки редуцируют в редуционном стане на трубы меньших диаметров. Редуцирование может проводиться с предварительный нагревом (горячее) и без него (холодное). Введение процесса редуцирования позволяет получать трубы с различными диаметрами и толщинами стенки без изменения размеров исходной заготовки. Степень деформации металла труб при холодном редуцировании выше, чем при калибровке, а, следовательно, выше их прочность и ниже пластичность. Проведение рекристаллизационного отжига холодно-редуцированных труб выводит их пластичность и прочность на уровень калиброванных.

Среди сортамента ТЭТ, выпускаемых ЗАО «БелТЭН», есть как калиброванные, так и редуцированные трубы. Выборочно механические свойства труб этого трубного завода приведены в таблице 5.

ТЭТ, являясь промежуточным продуктом, используются как исходный материал для изготовления различных изделий. Уровень механических свойств ТЭТ должен соответствовать не только назначению и условиям работы готовых изделий, но и технологическим требованиям, вытекающим из характера и степени производимой над трубами деформации в ходе изготовления этих изделий.

Технология изготовления может включать такие этапы, как деформация и сварка.

Таблица 5 – Механические свойства тонкостенных электросварных труб, произведенных на ЗАО «БелТЭН» по ГОСТ 10704-91

Диаметр трубы, мм	Прокат					Временное сопротив- ление раз- рыву, Н/мм ²	Относи- тельное удлине- ние, %	Раз- дача ε, %	Техно- логиче- ская схема произ- водства
	Тол- щина, мм	Марка стали	Кatego- рия вы- тяжки	Относи- тельное удлинение проката, %	Глубина сфериче- ской лун- ки, мм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10		08Ю	СВ	46	11,3	438-445	46-48	40-55	1
			СВ	43	11,3	336	43		1
			СВ	44	11,3	438-445	46-48		1
		08пс	Г	36	11,1	456-459	19-20		1
	0,8		Г	34	9,6	424-419	33		1
	0,8		Г	36	11,8	436-440	20		1
16	1	08Ю	ОСВ	41	11,4	313-314	50-53	40-65	1
	1		ОСВ	40	11,5	316-318	45-50		1
	1		СВ	42	11	320-322	41-43		1
	1		СВ	45	11,2	345-346	45		1
	1		ВГ	38	11,1	355	37-45		1
	1		ВГ	35	10,8	337-345	46		1

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	1	08Ю	ОСВ	41	12,0	289-291	50-52	55-60	1
	1		ОСВ	43	11,4	303-304	54		1
	1		СВ	41	11,7	308	52-54		1
	1		СВ	45	11,2	330-325	48-50		1
14	1,2	08Ю	СВ	43	11,3	442	30	40-50	3*
	1,2	08пс	СВ	42	11,0	484-475	25-28		3*
13,5	0,9	08Ю	СВ	45	11,1	439-433	23-24	40-55	3**
	1,1	08пс	СВ	43	11,3	474	22-23		3**
Примечания: * – редукция с диаметра 16 на диаметр 14 (редукционный стан в составе ТЭСА); ** – редукция с диаметра 16 на диаметр 13,5 (редукционный стан вне линии ТЭСА)									

Изменение формы и размеров заготовок из труб в целом может проводиться одним из следующих способов:

- деформацией растяжением поперек оси трубы (раздача труб);
- деформацией растяжением вдоль оси трубы (гибка труб);
- деформацией редуцированием (обжатие труб).

Повлиять на технологичность труб, чтобы сделать их наиболее пригодными для конкретных условий переработки, можно посредством проведения отжига. Рассмотрим влияние различных режимов отжига на свойства калиброванных и холодноредуцированных ТЭТ из сталей с пониженным содержанием примесей внедрения.

Авторами установлено, что исходная степень раздачи трубы (как калиброванной, так и редуцированной), изготовленной из сталей, приведенных в начале статьи, весьма высока и составляет 40–60 %. В большинстве случаев причиной прекращения увеличения наружного диаметра в ходе испытания на раздачу является образование гофра на образце. В этом случае можно говорить, что увеличение наружного диаметра труб при раздаче составляет более 40–60 %. Это в несколько раз превышает требования ГОСТ 10705-80 (6 %). Проведенные исследования показали, что кратковременный дорекристаллизационный отжиг при температуре до 400 °С практически не влияет на величину раздачи (она остается высокой). Отжиг при 450–500 °С несколько уменьшает раздачу, а при 600–950 °С – уменьшает сильно, как показано на рисунке 6. Увеличение длительности нагрева вызывает падение раздачи при более низких температурах нагрева.

Исходный уровень относительного удлинения составляет 40–50 % для калиброванных, 25–35 % для холодноредуцированных труб. Рекристаллизационный отжиг особенно целесообразен для редуцированных труб (рисунок 7). Проведенные исследования показали, что для калиброванных труб отжиг при 500 °С (15 мин) или при 550 °С (7 мин) снижает относительное удлинение. Это связано с критической степенью деформации наружных поверхностей труб, изготовленных методом калибрования. При рекристаллизационном отжиге происходит рост зерна не за счет образования зародышей новых зерен, а за счет слияния уже существующих. Появление чрезмерно больших столбчатых зерен и вызывает падение пластичности [8].

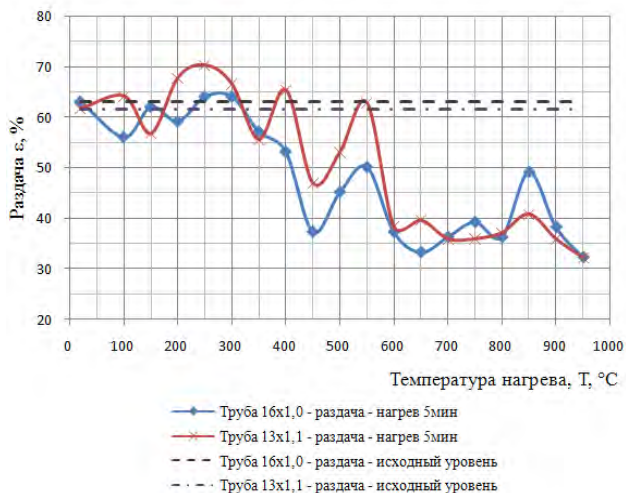


Рисунок 6 – Влияние нагрева на минимальный уровень раздачи калиброванных (Ø 16×1,0 мм) и редуцированных (Ø 13×1,0 мм) труб

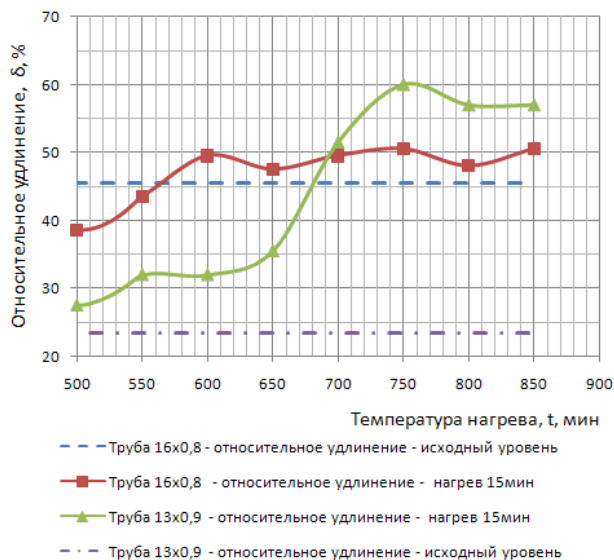


Рисунок 7 – Влияние рекристаллизационного отжига на пластичность калиброванных (Ø16×1,0 мм) и редуцированных (Ø13×1,0 мм) труб

Исходный уровень предела прочности составляет 300–450 Н/мм² для калиброванных, 400–500 Н/мм² для холодноредуцированных труб. В ходе исследований было установлено, что отжиг при 500 °С (15 мин) или при 550 °С (7 мин) повышает временное сопротивление как редуцированных, так и калиброванных труб (из-за критической степени деформации, как уже отмечалось выше). Рекристаллизационный отжиг при 700–750 °С в течение 10–15 мин максимально снижает временное сопротивление разрыву (рисунок 8).

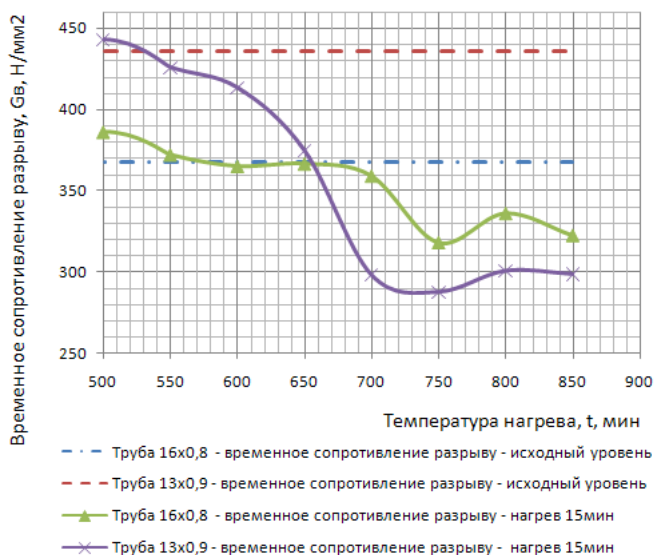


Рисунок 8 – Влияние рекристаллизационного отжига на прочность калиброванных (Ø16×1,0 мм) и редуцированных (Ø13×1,0 мм) труб

Выводы

1. ТЭТ, изготовленные из сталей с пониженным содержанием атомов внедрения, обладают высокой технологической пластичностью без дополнительной термообработки основного металла и сварного шва.

2. При изготовлении ТЭТ из сталей категории вытяжки ВГ (марок стали 08пс, 08Ю, 08кп) и Г (марки стали 08пс) возможно снижение уровня их пластичности в результате деформационного ста-

рения. Спровоцировать старение можно низкотемпературным нагревом или длительным вылеживанием.

3. При изготовлении ТЭТ из сталей категории вытяжки ОСВ, СВ (марки стали 08Ю) деформационное старение не проявляется. Для изготовления ответственных деталей следует использовать именно такие трубы.

4. Падение пластичности ТЭТ в результате деформационного старения можно исправить (и предотвратить) проведением такой операции, как перестаривание – нагрев и выдержка при 400 °С в течение 30 мин.

5. Величина раздачи как калиброванных, так и холодноредуцированных ТЭТ из сталей 08Ю и 08пс с пониженным содержанием примесей внедрения составляет 50–60 %. Рекристаллизационный и дорекристаллизационный отжиг уменьшают величину раздачи.

6. Отжиг при 700–750 °С в течение 10–15 мин увеличивает относительное удлинение и уменьшает временное сопротивление разрыву калиброванных и редуцированных труб до максимально возможных для них значений.

7. Для калиброванных труб отжиг при 500 °С (15 мин) или при 550 °С (7 мин) снижает относительное удлинение и увеличивает временное сопротивление разрыву. Это связано с критической степенью деформации наружных поверхностей труб, изготовленных методом калибрования.

Литература

1. **Франценюк, И.В.** Современное металлургическое производство / И.В. Франценюк, Л.И. Франценюк. – М.: Металлургия, 2000. – 528 с.

2. **Франценюк, И.В.** Особенности отжига широкополосной стали 08Ю в водородной колпаковой печи / И.В. Франценюк, Л.И. Франценюк // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 77–81.

3. **Науменко, В.Д.** Совершенствование режимов отжига ленты из углеродистых и легированных сталей / В.Д. Науменко, М.П. Мишин, С.Ф. Пашиков // Сталь. – 2002. – № 1. – С. 68–70.

4. **Суханов, Ю.Ф.** Совершенствование технологии выплавки автолистовой стали / Ю.Ф. Суханов, А.И. Дагман, В.Н. Хребин // Сталь. – 2005. – № 4. – С. 73–75.

5. Условия предотвращения старения автолистовой стали 08Ю после непрерывного отжига / И.Г. Радионова [и др.]. // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 71–74.

6. Бабич, В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.

7. Технология производства труб: учебник для вузов / И.Н. Потапов [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 528 с.

8. Шмитт-Томас, К.Г. Металловедение для машиностроения / К.Г. Шмитт-Томас; пер. с нем. под ред. В.А. Скуднова. – М.: Металлургия, 1995. – 512 с.

УДК 621.746

**С.Ф. КУКИН (РУП «МТЗ»)
Т.Н. СЕНИЧЕНКО (БНТУ)**

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НОРМАЛИЗАЦИИ СТАЛИ 40Х

Введение. Одним из перспективных способов интенсификации технологических процессов поверхностного упрочнения деталей, термической обработки сталей является воздействие мощного ультразвука. В основе указанных технологических процессов лежат такие физические явления, как движение межфазной поверхности, диффузия атомов [1]. Кинетика этих явлений сложна и определяется, в основном, характером распределения и взаимодействия дефектов кристаллической решетки типа дислокаций, вакансий и межузельных атомов друг с другом и с атомами примесей. Технологии с применением ультразвука при термической обработке металлов до последнего времени не находят широкого распространения в промышленности, хотя эффекты ультразвукового воздействия на изменение структуры металлов и сплавов при термической обработке весьма существенны [2].

Ниже приведены комбинированные виды термической обработки с использованием ультразвука [3]: