

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУПЕРСКОРОСТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

*В.С. Вахрушева, Т.Н. Буряк, Н.С. Тумко, Е.Я. Лезинская, В.Г. Буланый  
Государственный трубный институт, г. Днепропетровск, Украина*

Конструкционные материалы ядерных реакторов, работающие в течение длительного периода под воздействием повышенных температур, агрессивных коррозионных сред и нейтронного облучения, подвержены процессам ползучести, снижению пластичности, коррозионному разрушению. В обеспечении комплекса служебных свойств структурное состояние металла имеет основополагающее значение. Получение квазиизотропной и мелкозернистой структуры с большим количеством границ раздела (границ зерен, двойников и блоков) и чистотой межзеренных границ, повышающей радиационную стойкость, достигается соответствующими режимами нагрева, термической обработки и холодной деформации. В оборудовании ядерных реакторов широко используются особотонкостенные трубы малых размеров из коррозионно-стойких хромо-никелевых сталей аустенитного класса типа X18N10, X17N14, X16N15.

В практике трубного производства в качестве термической обработки труб специального назначения применяют печной нагрев в вакууме или защитной атмосфере, а также электроконтактный либо индукционный скоростной нагрев. С целью совершенствования режимов скоростного нагрева в Государственном трубном институте разработан суперскоростной нагрев способом импульсной термомагнитной обработки (ИТМО) [1].

ИТМО призвана решать задачи резкого сокращения времени выдержки трубы в горячем состоянии до длительности протекания структурных преобразований в металле труб. Ее суть заключается в том, что с помощью специальных устройств к трубе подается регулируемая энергия импульса тока. Параметры ИТМО: скорость нагрева  $10^4 \dots 10^7$  – С/с, скорость охлаждения  $10^3 \dots 10^4$  – С/с, интервал температур нагрева ограничен лишь температурой плавления металла и составляет 200...1500 – С, среда обработки - воздух, вода и т.д. Уникальность данного способа заключается еще и в том, что для ускорения охлаждения трубы и уменьшения слоя окисной пленки процесс нагрева может осуществляться непосредственно в охлаждаемой среде или жидкости.

Влияние импульсной термомагнитной обработки на структуру и свойства коррозионно-стойких сталей аустенитного класса исследовали на особотонкостенных трубах  $\varnothing 8,2 \times 0,6$  и  $\varnothing 6,9 \times 0,3$  мм

из сталей марок 08X18N10T и 03X17N14M3 соответственно. Опробованы три варианта подачи электрического тока (рис.1): аperiodическая форма импульса (1), однополупериодная (2) и двухполупериодная (3) в интервале скоростей нагрева  $10^6 \dots 10^7$  – С/с

Экспериментально полученные данные свидетельствуют о благоприятном протекании процессов разупрочнения и рекристаллизации в трубах из коррозионно-стойких аустенитных сталей с возможностью получения высокого комплекса структурных, прочностных и пластических характеристик.

Проведено сравнительное исследование процессов рекристаллизации металла труб после различных способов нагрева. При ИТМО интервал рекристаллизации смещается в более высокотемпературную область в сравнении с другими известными способами термообработки и находится в интервале температур (рис.2): температура начала рекристаллизации  $T_n^p$  930...970 – С, температура конца рекристаллизации  $T_k^p$  1000...1100 – С (при печном нагреве  $T_n^p \nabla 700$  – С,  $T_k^p \nabla 850$  – С). Не обнаружено влияние подачи тока на тип микроструктуры труб. Характер разупрочнения труб  $\varnothing 6,9 \times 0,3$  мм из стали 03X17N14M3 в зависимости от параметров ИТМО приведен на рис.3.

Поскольку между структурой металла труб и их свойствами существует достаточно надежная связь, предопределяющая эксплуатационную надежность, то к основным критериям качества труб для АЭС относятся величина зерна и состояние границ зерен, с которыми связан весь комплекс служебных свойств, - механическая прочность, достаточный ресурс пластичности, ползучесть, межкристаллитная коррозия и др. Существенное влияние на рекристаллизационные процессы оказывает форма импульса тока и его плотность в момент достижения  $T_n^p$ . Для формы импульса 2, когда плотность тока при  $T_n^p$  достигает максимального пика, характерны наиболее низкие и узкие интервалы рекристаллизации. Снижение плотности тока в момент начала рекристаллизации при форме импульса 1 и практическое его отсутствие при форме 3 приводит к повышению  $T_n^p$  и расширению интервала рекристаллизации, т.е. не только скорость и температура нагрева, но и плотность тока в трубе влияют на процессы разупрочнения в трубах (табл.

1).

В результате печной термообработки со скоростью не более 10 - С/с, когда предусмотрена выдержка трубы в горячем состоянии, могут получить развитие процессы вторичной рекристаллизации, приводящие к росту зерен и разнотерности, а также выделение из твердого раствора к границам зерен элементов, образующих избыточные карбидные и интерметаллидные фазы, что снижает пластичность и стойкость против межкристаллитной коррозии аустенитных сталей и сплавов. При скоростном нагреве трубы из аустенитных сталей типа X18N10, X17N14, X16N15, сплавов ЭП630, ЭП648, приобретают улучшенный комплекс свойств благодаря формированию более однородной мелкодисперсной структуры и свободным от выделений границам зерен, что достигается подавлением процессов вторичной рекристаллизации, сужения температурного интервала рекристаллизации и смещения его в более высокотемпературную область, где не происходит диффузионное перемещение атомных примесей к границам зерен.

В трубах, подвергнутых ИТМО, наблюдается

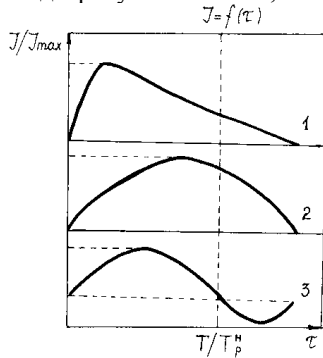


Рис. 1. Формы импульсов электрического тока, применяемые при ИТМО: 1 – аperiodическая форма импульса; 2 – однополупериодная форма импульса; 3 – двухполупериодная форма импульса;  $J/J_{max}$  – текущее и максимальное значение тока;  $\tau$  – время;  $T$  – текущее значение температуры трубы;  $T_n^p$  – температура начала рекристаллизации

пониженная склонность к росту зерна аустенита (диаметр зерна менее 2,8 мкм), формирование мелкозернистой структуры с двойниками и чистотой границ зерен, свободных от сегрегаций\* (рис.4, табл.2). Таким образом, при ИТМО в разупрочнении и формировании структуры принимают участие дислокационные процессы, ответственные за протекание первичной рекристаллизации и подавляющие диффузионное перемещение атомных примесей к границам зерен.

Сопоставление уровня механических свойств после различных режимов термообработок показывает, что комплекс механических характеристик после ИТМО благоприятнее, чем после печного или электроконтактного нагрева (см.табл. 2), когда в трубах формируются более высокие значения прочности

( $\sigma_b, \sigma_T$ ) при одновременном повышении пластичности ( $\delta_5$ ), что достигается во многом благодаря структуре металла.

\*Исследования на электронном микроскопе ЭМК-125 выполнил Г.Д. Сухомлин (ГТИ)

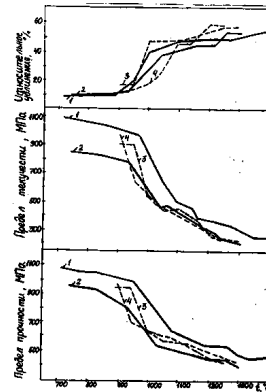


Рис.2. Влияние параметров ИТМО на разупрочнение труб ? 6,9x0,3 мм из стали 03X17N14M3. Скорость нагрева: 1-10<sup>6</sup> С/с, форма импульса-1; 3-10<sup>7</sup> С/с, форма импульса 3; 4-10<sup>7</sup> С/с, форма импульса-2.

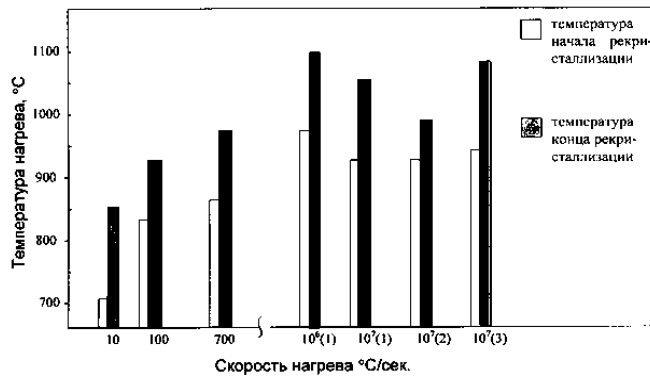


Рис.3. Температурные параметры протекания рекристаллизации в трубах ? 6,9 x 0,3 мм из стали 03X17N14M3

**Параметры протекания рекристаллизации в трубах разм., 6,9?03 мм  
из стали 03X17H14M3**

● Вид нагрева	● Скорость нагрева, - С/с	● Температура рекристаллизации, - С		
		$T_p^н$	$T_p^к$	$T_p^н - T_p^к$
● Печной в вакууме	10	700	850	150
Электроконтактный	100	830	930	100
Электроконтактный	700	870	970	100
ИТМО - 1	$10^6$	970	1100	130
ИТМО - 1	$10^7$	930	1060	130
ИТМО - 2	$10^7$	940	1000	60
ИТМО - 3	$10^7$	960	1080	120

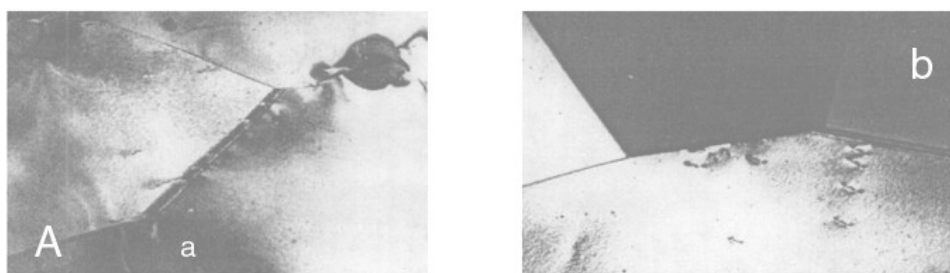


Рис. 4. Структура металла труб после ИТМО: а – сталь 08X18H10Т,  $\square$  8,2x0,6мм; б – сталь 03X17H14M3,  $\square$  6,9x0,3 мм

**ТАБЛИЦА 2  
СВОЙСТВА ТРУБ РАЗМ. 6,9?0,3 ММ ИЗ СТАЛИ 03X17H14M3 ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ  
ВИДОВ НАГРЕВА**

● Вид нагрева	● Скорость нагрева, - С/с	● Механические свойства при 20 - С			● Величина зерна ● $D_{ср}$ , ● мкм
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	
● Печной в вакууме	10	657	343	40	11...16
Электроконтактный	100	657	417	44	32...45
● Электроконтактный	700	676	382	47	7,8...11
ИТМО - 1	$10^6$	696	463	45	2,8 и менее
ИТМО - 1	$10^7$	627	480	48	2,8 и менее
ИТМО - 2	$10^7$	686	441	45	2,8 и менее
ИТМО - 3	$10^7$	676	402	48	2,8 и менее

**⊗ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Суперскоростная импульсная термомагнитная обработка является эффективным способом улучшения комплекса служебных свойств труб из коррозионно-стойких сталей и сплавов, используемых в ядерных реакторах, что достигается однородной мелкозернистой квазиизотропной структурой с большим количеством границ раздела

(двойников и блоков, границ зерен), свободных от выделений.

**⊗ЛИТЕРАТУРА**

1. Разработка установки и технологии импульсной термообработки особотонкостенных труб из сталей и сплавов: *Отчет НИР/ВНИТИ*, 1.21.17-5-К-217-91-Р. Днепропетровск, 1991. 79 с.