



## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА НАПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ ТИПА ШТАМПОВЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

**И. А. РЯБЦЕВ**, д-р техн. наук, **И. А. КОНДРАТЬЕВ**, канд. техн. наук, **А. А. БАБИНЕЦ**, инж.,  
**Г. Н. ГОРДАНЬ**, канд. техн. наук, **Т. В. КАЙДА**, **И. Л. БОГАЙЧУК**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние высокотемпературных циклических нагрузок на термическую стойкость, структуру и микроскопическую химическую неоднородность наплавленного металла типа штамповых теплостойких сталей. Показано, что несмотря на отсутствие в процессе испытаний диффузии основных легирующих элементов в структуре наплавленного металла обнаружены изменения, приводящие к его разупрочнению.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, порошковая проволока, наплавленный металл, прокатные валки, штампы, термоциклирование, термическая стойкость, структура

Одним из основных видов изнашивания рабочих поверхностей прокатных валков, штампов и других инструментов для горячего деформирования металлов является термическая усталость — образование сетки трещин разгара в результате циклических высокотемпературных нагрузок [1–4]. Трещины термической усталости появляются на поверхности деталей после некоторого (относительно небольшого) количества теплосмен в результате действия циклических термических напряжений, возникающих вследствие несвободного изменения размеров отдельных участков детали при периодических колебаниях значений температуры [5–8].

Сочетание циклических температур и упруго-пластических деформаций является отличительной особенностью неизотермической циклической усталости. Вид неизотермического циклического разрушения, при котором сжатие в цикле упругопластического деформирования соответствует максимальной температуре термического цикла, получил название термической усталости [5, 6]. Характеристикой сопротивления материалов термической усталости обычно служит количество циклов нагрев–охлаждение до появления трещин [2, 3].

В зависимости от методики испытаний, в той или иной мере отвечающей условиям эксплуатации деталей, для большинства материалов количество теплосмен, приводящее к появлению трещин термической усталости, не превышает нескольких сотен или тысяч циклов нагрев–охлаждение [2, 3].

Кроме термических напряжений, при исследовании термической стойкости наплавленного металла необходимо также учитывать структурные изменения, которые могут в нем происходить в результате циклических высокотемпературных воздействий. Необратимые изменения структуры и свойств наплавленного металла в процессе эксплуатации во многом определяют работоспособность и надежность наплавленных инструментов для горячего деформирования металлов и сплавов. Цель данной работы заключалась в исследовании структурных превращений в наплавленном металле типа штамповых теплостойких сталей в результате его испытаний на термическую стойкость.

Опытными порошковыми проволоками наплавливали заготовки с предварительным подогревом до 300 °С, после чего следовало их замедленное охлаждение. Фактический состав наплавленного металла и его твердость приведены в табл. 1. Из наплавленных заготовок изготавливали образцы размерами 40×40×40 мм для определения термической стойкости наплавленного металла.

Изучение термической стойкости проводили на блочно-модульной установке для испытаний различных свойств наплавленного металла [9] по следующей методике: нагрев шлифованной поверхности наплавленного образца до 680...700 °С, быстрое охлаждение водой до 70...90 °С. Термостойкость оценивали по количеству циклов нагрев–охлаждение до появления трещин разгара.

**Таблица 1. Химический состав наплавленного металла и его твердость**

Марка порошковой проволоки	Массовая доля элементов, %							Твердость HRC
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	
ПП-Нп-30X4B2M2FC	0,35	0,72	1,1	3,97	2,52	1,88	0,44	50
ПП-Нп-35B9X3ГСФ	0,34	0,60	1,0	3,00	9,30	—	0,71	54



**Таблица 2. Результаты испытаний на термическую стойкость наплавленного металла**

Тип наплавленного металла	Появление трещин		
	первых	сетки	развитой сетки
30X4B2M2ФС	45	80	120
35B9X3ГСФ	30	70	100
Сталь 5ХНМ	15	50	70

Результаты испытаний на термическую стойкость наплавленного металла, а также значения термической стойкости для широко применяемой штамповой стали 5ХНМ, закаленной и отпущенной на твердость *HRC* 50, приведены в табл. 2. На рис. 1 показана поверхность наплавленных образцов после испытаний на термическую стойкость.

Лучшие показатели термической стойкости имел наплавленный металл типа хромвольфрамо-

молибденовой стали со сравнительно небольшим содержанием вольфрама.

Микроструктура наплавленного металла исследована до и после испытаний на термическую стойкость. При этом для более полного развития трещин разгара количество циклов нагрев–охлаждение для всех образцов довели до 200. Микроструктуру металла после наплавки исследовали в последнем наплавленном слое, а после испытаний термостойкости — в зоне термоциклирования (расположения трещин разгара) на расстоянии примерно 10...20 мкм от поверхности наплавленного слоя.

Микроструктура наплавленного металла обоих типов до и после испытаний показана на рис. 2, а при небольшом увеличении в зоне трещин разгара — на рис. 3.

Металл 30X4B2M2ФС непосредственно после наплавки имел мелкоигольчатую мартенситно-бейнитную структуру с твердостью *HV* 5140...6060 МПа, по границам полигонизации зафиксированы выделения остаточного аустенита и незначительное количество эвтектики (рис. 2, а). После термоциклирования в зоне изнашивания обнаружены трещины (рис. 3) и структурные изменения, свидетельствующие о коагуляции и сфероидизации карбидов (рис. 2, б), а также распад мартенсита и частичный распад эвтектики по границам полигонизации, что привело к снижению твердости до *HV* 3830...4010 МПа.

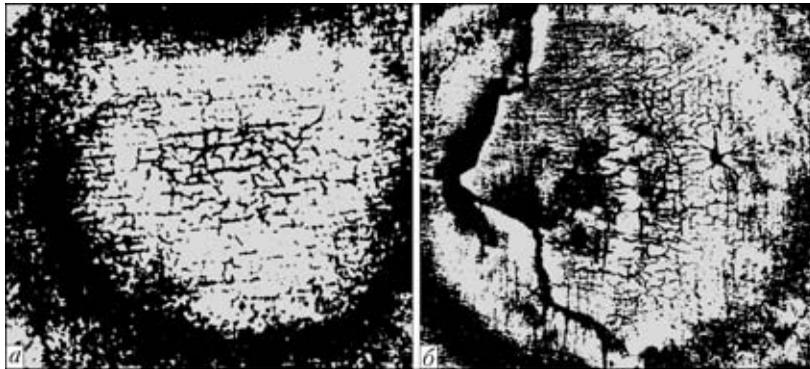


Рис. 1. Внешний вид образцов после испытаний на термическую стойкость наплавленного металла: а — 30X4B2M2ФС; б — 35B9X3ГСФ

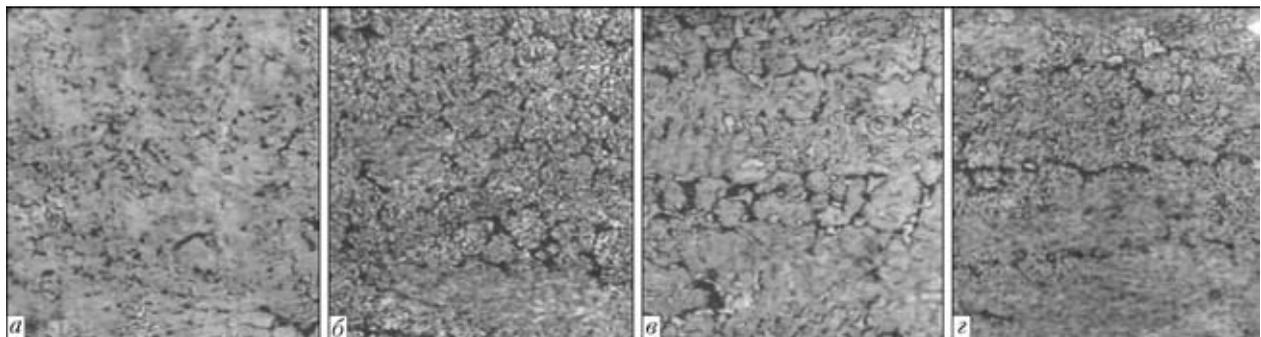


Рис. 2. Микроструктуры (×400) наплавленного металла 30X4B2M2ФС (а, б) и 35B9X3ГСФ (в, г) до (а, в) и после (б, г) испытаний на термическую стойкость

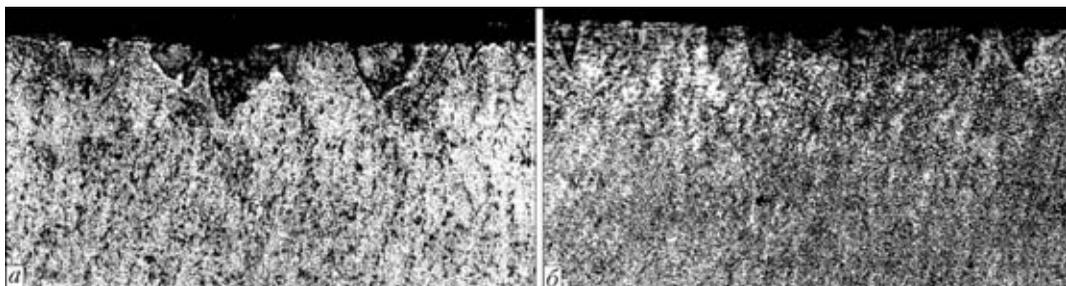


Рис. 3. Микроструктуры (×100) наплавленного металла 30X4B2M2ФС (а) и 35B9X3ГСФ (б) в зоне термоциклирования

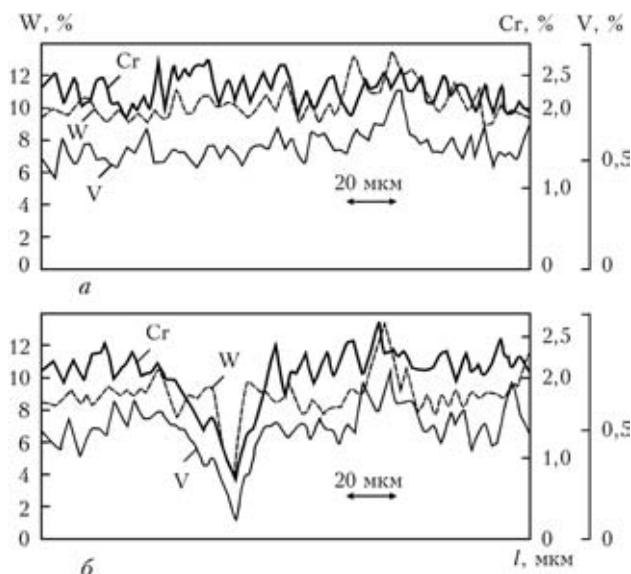


Рис. 4. Распределение легирующих элементов в наплавленном металле 35В9Х3ГСФ до (а) и после (б) испытаний на термическую стойкость

Примерно такая же картина отмечена и у наплавленного металла 35В9Х3ГСФ. После наплавки зафиксирована мартенситная структура матрицы с микротвердостью  $HV$  5140 МПа, а по границам полигонизации обнаружены выделения остаточного аустенита и незначительное количество эвтектики (см. рис. 2, в). После испытаний на термическую стойкость отмечен распад мартенситной составляющей ( $HV$  3090 МПа), при этом сохранились небольшие участки остаточного аустенита (см. рис. 2, г).

Исследования микроструктуры показали, что в результате многократного нагрева и охлаждения (термоциклирования) в поверхностном слое наплавленного металла происходят структурные изменения, приводящие к его разупрочнению. Это подтвердили и результаты рентгеноструктурного анализа фазового состава. Например, в металле типа 35В9Х3ГСФ после термоциклирования содержание  $\alpha$ -фазы увеличивалось от 84 до 87 % вследствие появления ферритной составляющей. При этом напряжение сжатия II рода возросло от  $-0,27$  до  $-0,44$  ГПа.

Проведено микрорентгеноспектральное исследование на анализаторе «Самебах SX50» распределения основных легирующих элементов в структуре наплавленных образцов до и после испытаний на термическую стойкость на глубине

до 20 мкм от поверхности наплавки параллельно ей в автоматическом режиме с интервалом 2...99 мкм вдоль фронта сетки трещин разгара. На рис. 4 приведены результаты исследований наплавленного металла типа 35В9Х3ГСФ. Распределение основных легирующих элементов в наплавленном металле было практически равномерным (рис. 4, а) и оставалось примерно таким же и после испытаний на термическую стойкость, за исключением одного момента — в зоне трещины термической усталости отмечено резкое снижение содержания легирующих элементов (рис. 4, б), вероятно, из-за их окисления.

Примерно такой же характер распределения легирующих элементов (до и после испытаний) зафиксирован и в наплавленном металле типа 30Х4В2М2ФС.

По-видимому, температурно-временные параметры выбранной методики испытаний на термическую усталость наплавленного металла не приводят к диффузии основных легирующих элементов исследуемых типов наплавленного металла.

Таким образом, в результате многократного нагрева и охлаждения в поверхностном слое наплавленного металла типа инструментальных штамповых сталей хотя и не зафиксирована диффузия основных легирующих элементов, но отмечены изменения структуры, приводящие к разупрочнению наплавленного металла.

1. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Metallurgizdat, 1961. — 421 с.
2. Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. — М.: Металлургия, 1971. — 608 с.
3. Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — Киев: Экотехнологія, 1999. — 62 с.
4. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Экотехнологія, 2004. — 160 с.
5. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. — М.: Машиностроение, 1980. — 200 с.
6. Баландин Ю. Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. — Л.: Судостроение, 1967. — 272 с.
7. Тылкин М. А., Яловой Н. И., Полухин П. Т. Температура и напряжения в деталях металлургического оборудования. — М.: Высш. шк., 1970. — 427 с.
8. Термопрочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, И. В. Демьянушко и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 455 с.
9. Рябцев И. И., Черняк Я. П., Осин В. В. Блочная установка для испытаний наплавленного металла // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 18–20.

The effect of high-temperature cyclic loads on heat resistance, structure and microscopic chemical heterogeneity of deposited metal of the type of heat-resistant die steels was investigated. Despite the fact that no diffusion of the main alloying elements was detected during the testing process, it showed that structure of deposited metal experienced changes leading to its weakening.

Поступила в редакцию 03.01.2012