

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

А.А. БАБИНЕЦ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время отсутствует общепризнанная методика испытаний термической стойкости многослойных наплавленных образцов. Существующий достаточно широко применяемый метод оценки термической стойкости, основанный на определении количества циклов нагрев-охлаждение до появления сетки термических трещин, не позволяет провести точную оценку термостойкости при испытаниях многослойных наплавленных образцов, обладающих достаточно высокой термической стойкостью. Цель работы заключается в создании или усовершенствовании методики оценки термической стойкости многослойного наплавленного металла, которая бы позволила исследовать динамику распространения термических трещин по глубине наплавленного слоя и ее изменение в зависимости от характеристик наплавленных слоев. Усовершенствована разработанная ранее в ИЭС им. Е.О. Патона методика, что позволило провести точную оценку термической стойкости наплавленного металла. Установлено, что характер линии сплавления оказывает определенное влияние на термическую стойкость образца в целом, при этом наплавка пластичного подслоя проволокой Св-08А способствует торможению роста трещин термической усталости и увеличению общей термостойкости примерно на 20 %. Усовершенствованная методика может быть использована для точной оценки термической стойкости наплавочных материалов, применяющихся при изготовительной или восстановительной наплавке инструментов для горячего деформирования. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, многослойный наплавленный металл, термическая стойкость, методика испытаний

Сопротивление термической усталости (термическая стойкость) – одно из основных свойств инструментальных сталей, которые применяются в процессе изготовления или восстановления широкой номенклатуры инструментов для горячего деформирования металлов [1–3]. К их числу относятся различные валки станов горячей прокатки, ролики машин непрерывного литья заготовок, штампы горячей штамповки и др.

В результате циклических термических нагрузок на поверхности таких инструментов появляется сетка относительно мелких термических трещин. Эти трещины облегчают вырывание частиц металла, ускоряют истирание и способствуют быстрому развитию износа [4, 5]. Такие повреждения, развивающиеся в сложных условиях эксплуатации, могут привести не только к браку выпускаемой продукции, но и к преждевременному разрушению инструмента, что влечет за собой значительные материальные потери.

В настоящее время отсутствует общепризнанная методика испытаний термической стойкости многослойных наплавленных образцов. Стандартизованный метод испытаний материалов при термомеханическом нагружении [6] невозможно применить к материалам, которые используются для восстановления деталей металлургического оборудования, т.к. образцы, используемые в данном методе, имеют цилиндрическое сплошное (тол-

щина до 22 мм) или полое (толщина стенки 2 мм, диаметр до 12 мм) сечение. Образцы такой формы и размеров не позволяют оценить влияние на термическую стойкость многослойного наплавленного металла образца в целом.

В связи с этим подобные испытания чаще всего проводят при помощи различных экспериментальных методик, в большинстве которых критерием термической стойкости является число циклов нагрев-охлаждение до появления сетки трещин термической усталости [1, 2, 7–10]. ИЭС им. Е.О. Патона представляет одну из таких методик испытаний, а также разработанную лабораторную установку [10], которая отличается следующими преимуществами:

- размеры используемых образцов обеспечивают необходимый температурный градиент и напряженное состояние, близкие к возникающим во время эксплуатации реальных деталей металлургического оборудования. При этом образцы имеют простую и удобную для изготовления форму без резких переходов, играющих роль концентраторов напряжений;

- обеспечивается способ нагрева и охлаждения, наиболее близкий к реальным условиям эксплуатации;

- обеспечивается возможность регулирования и контроля температуры нагрева и охлаждения образца, и воспроизводимость этих условий для всех испытываемых образцов.

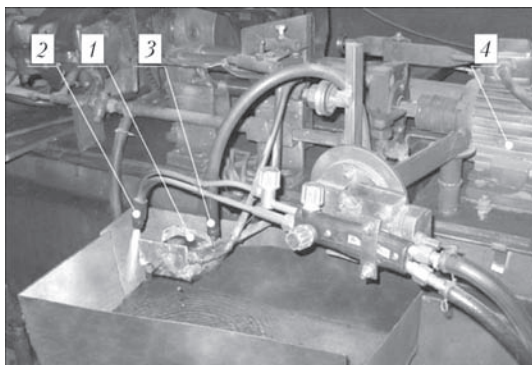


Рис. 1. Установка для испытания термической стойкости наплавленного металла: 1 — испытываемый образец, закрепленный в оправке; 2 — источник нагрева (газопламенный резак); 3 — источник охлаждения (шланг подачи воды); 4 — привод обратно-поступательного перемещения оправки

Процесс испытаний по данной методике выглядит следующим образом (рис. 1). Наплавленный образец 1 размером 40×40×40 мм устанавливается в оправку установки так, чтобы шлифованная наплавленная поверхность была обращена к источнику нагрева — газопламенному резаку 2. В процессе испытания при помощи привода обратно-поступательного движения 4 оправка с закрепленным в ней образцом циклически перемещается от источника нагрева к источнику охлаждения 3. При этом равномерный нагрев поверхности обеспечивается в пятне диаметром 15...20 мм. Длительность нагрева — 11 с, а охлаждения струей воды — 8 с.

При указанной продолжительности нагрева и охлаждения температура в пятне растет в течение первых 8...10 циклов испытания, а затем стабили-

зируется в пределах 700...800 °С во время нагрева и 20...60 °С после охлаждения. Контроль температуры во время испытаний осуществляется при помощи термопар. Термическая стойкость оценивается по числу циклов нагрев-охлаждение до появления и развития в пятне нагрева сетки термических трещин, видимой невооруженным глазом. Для получения достоверных результатов испытывается по три-пять образцов каждого типа наплавленного металла. После испытаний образцы в некоторых случаях разрезают в поперечном направлении по пятну нагрева для оценивания на макрошлифах глубины распространения трещин.

Однако исследования термической стойкости наплавленного металла, выполненные по данной методике, показывают [4, 11, 12], что в большинстве случаев максимальное количество циклов нагрев — охлаждение до появления сетки термических трещин не превышает 200. При этом глубина распространения трещин составляет 0,2...0,5 мм и практически не возрастает, при дальнейшем увеличении числа циклов увеличивается лишь раскрытие трещин. Таким образом, при испытаниях по данной методике невозможно оценить динамику и характер развития трещин термической усталости по толщине наплавленных слоев.

Целью данной работы является создание или усовершенствование методики оценки термической стойкости многослойного наплавленного металла, которая бы позволила исследовать динамику распространения термических трещин по глубине наплавленного слоя и ее изменение в зависимости от характеристик наплавленных слоев.

Для достижения поставленной цели за основу была взята вышеописанная методика испытаний [10], которая была усовершенствована следующим образом. Было предложено проводить испытания образцов в несколько этапов, длительностью по 200 циклов нагрев — охлаждение каждый, с последующим шлифованием поверхности после каждого этапа. Шлифование производили до полного удаления термических трещин, фиксируя при этом их глубину, что позволяло оценить динамику распространения трещин по толщине наплавленного металла. Эти операции повторялись до достижения минимально возможной толщины наплавленного рабочего слоя, которая составляла 1,5...2,0 мм, после чего проводился заключительный этап термоциклирования без последующей шлифовки. Далее образцы разрезались по пятну нагрева (рис. 2), после чего на макрошлифах исследовалась глубина и характер распространения термических трещин.

По указанной методике оценивали термическую стойкость образцов многослойного наплавленного металла четырех типов. Для этого на

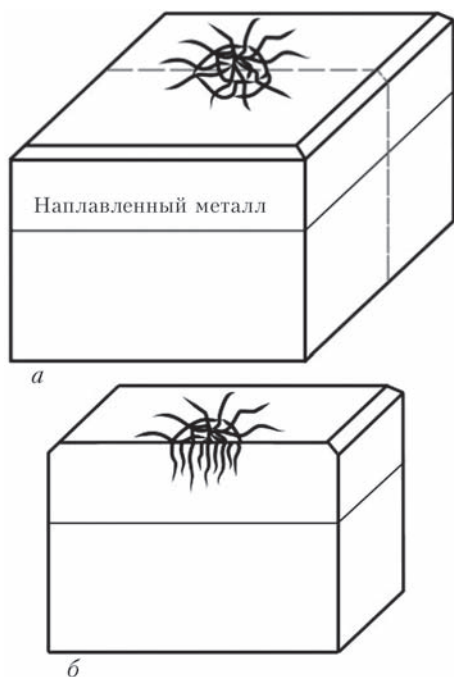


Рис. 2. Схема порезки образца для изготовления макрошлифа: а — образец после испытания; б — образец после порезки

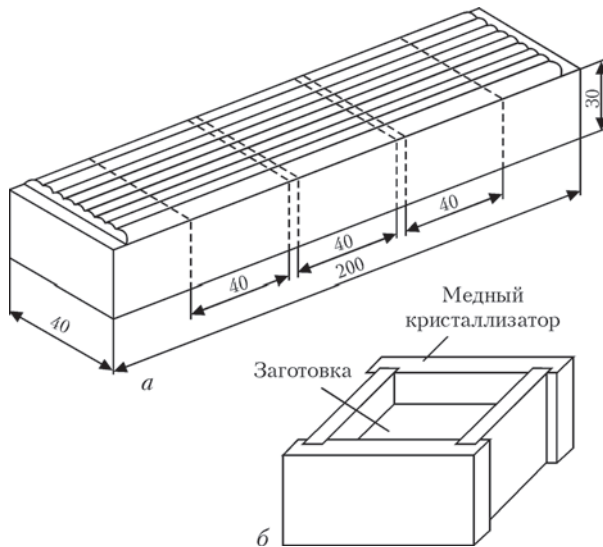


Рис. 3. Схема изготовления многослойных наплавленных образцов для исследования термической стойкости: а — при автоматической наплавке под флюсом; б — при полуавтоматической наплавке самозащитными порошковыми проволоками заготовки из стали 40Х производилась электродуговая наплавка рабочего слоя порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС по следующим вариантам: наплавка без подслоя и наплавка рабочего слоя с подслоем, наплавленным проволокой Св-08А. Учитывая, что на термическую усталость значительное влияние оказывают концентраторы напряжений, резкие переходы формы, структурная неоднородность и т.д. [1, 2], было высказано предположение, что глубина и форма проплавления также влияют на термическую стойкость металла. Исходя из этого, наплавка опытных образцов проводилась по двум технологиям:

- на пластины размером 30×40×200 мм производилась автоматическая многослойная наплавка, после чего из наплавленных заготовок вырезались образцы для испытаний размером 40×40×40 мм (рис. 3, а);

- заготовка размером 30×40×40 мм устанавливалась в разборной медный кристаллизатор, после чего выполнялась полуавтоматическая электродуговая многослойная наплавка самозащитными порошковыми проволоками (рис. 3, б).

Автоматическая наплавка на пластины сплошной проволокой Св-08А производилась под флюсом АН-348А, а наплавка порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС — под флюсом АН-26П. Диаметр всех проволок 2,0 мм. Режимы наплавки:  $I_n = 300...350$  А,  $U_n = 28...30$  В,  $v_n = 20$  м/ч. Шаг на-

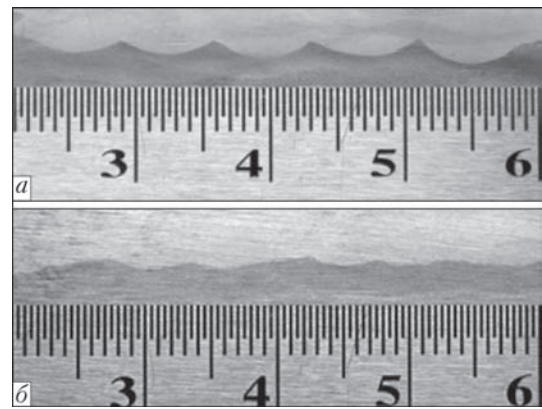


Рис. 4. Поперечные макрошлифы образцов, наплавленных автоматическим (а) и полуавтоматическим способом (б)

плавки был равен 40 % ширины наплавляемого валика.

Полуавтоматическая наплавка в медном кристаллизаторе сплошной проволокой Св-08А осуществлялась в защитном газе  $CO_2$ , диаметр проволоки 0,8 мм; диаметр самозащитной порошковой проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС 1,8 мм. Режимы наплавки:  $I_n = 200...220$  А,  $U_n = 22...24$  В.

На всех образцах общая толщина подслоя составляла 3...4 мм, а рабочего слоя — 5...6 мм. Твердость, а также данные спектрального анализа по химическому составу наплавленного металла приведены в таблице. Символы (А) и (П) в таблице означают автоматическую и полуавтоматическую наплавку соответственно.

После наплавки один образец из каждой партии был разрезан перпендикулярно направлению наплавки для проведения металлографических исследований. На изготовленных макрошлифах наплавленного металла видно, что применение проволоки меньшего диаметра в сочетании с колебательными движениями электрода при полуавтоматической наплавке, обеспечило меньшую глубину проплавления и более плавную линию сплавления, по сравнению с наплавкой под флюсом (рис. 4).

Далее, для сравнения, были проведены испытания термической стойкости по стандартной методике до появления развитой сетки термических трещин. Результаты испытаний показали (рис. 5), что все четыре типа наплавленного металла имеют практически одинаковую, достаточно высокую термостойкость. Вместе с тем были отмечены две закономерности:

**Химический состав и твердость наплавленного металла в зависимости от способа наплавки**

№ образца	Тип наплавленного металла	Способ наплавки	Содержание легирующих элементов, мас. %						Твердость HRC
			С	Si	Mn	Cr	V	Mo	
1.1	ПП-Нп-25Х5ФМС (без подслоя)	А	0,24	0,72	0,53	4,90	0,35	0,95	48...50
1.2		П	0,26	0,79	0,64	5,50	0,40	1,01	49...51
2.1	Подслоя Св-08А + ПП-Нп-25Х5ФМС	А	0,24	0,74	0,56	5,10	0,37	0,97	48...50
2.2		П	0,26	0,76	0,64	5,40	0,40	0,99	49...51

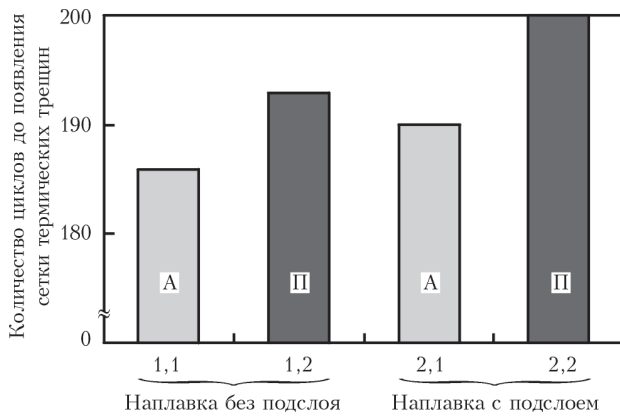


Рис. 5. Термическая стойкость образцов наплавленных по двум разным технологиям: автоматическая (А) наплавка под флюсом; полуавтоматическая (П) наплавка самозащитной порошковой проволокой

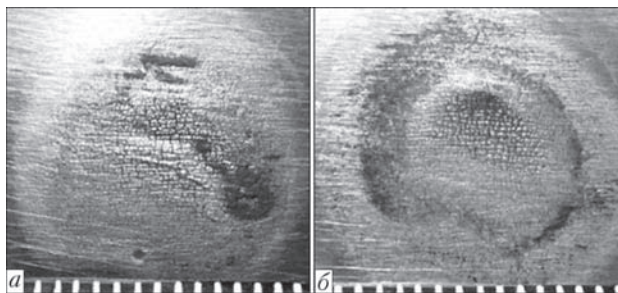


Рис. 6. Внешний вид поверхности образцов, наплавленных порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС без подслоя (а) и с подслоем (б), наплавленным проволокой Св-08А, после испытаний на термическую стойкость

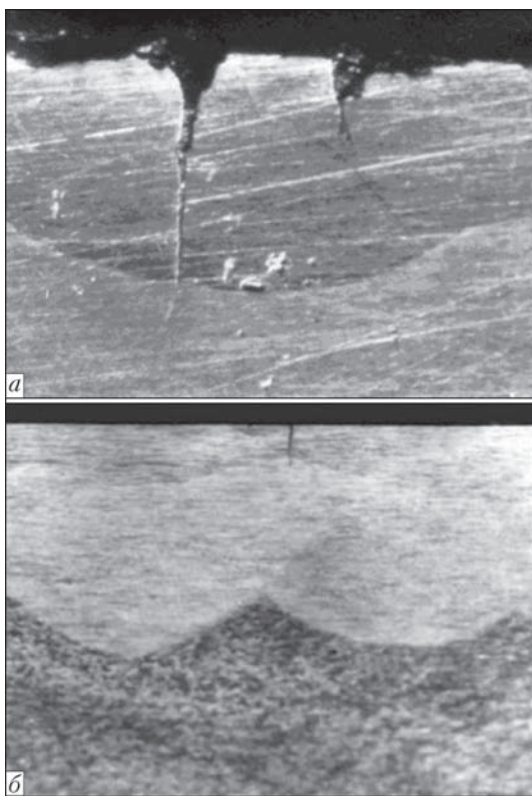


Рис. 7. Макрошлиф поперечного сечения образцов, наплавленных без подслоя (а) и с подслоем, наплавленным проволокой Св-08А (б), после испытаний на термическую стойкость

- термостойкость образцов, наплавленных полуавтоматическим способом, выше, чем у образцов наплавленных автоматическим способом;
- наплавка подслоя способствует увеличению термической стойкости.

Первая закономерность, по-видимому, объясняется тем, что в образцах, наплавленных полуавтоматическим способом, уменьшение глубины проплавления и более равномерная граница сплавления между отдельными наплавленными валиками/слоями способствует снижению уровня химической и структурной неоднородности, что положительно влияет на термическую стойкость. Для объяснения второй закономерности образцы были подвергнуты испытаниям по вышеуказанной усовершенствованной методике.

Анализ полученных результатов показал, что образцы, наплавленные без подслоя, имеют сильно развитую сетку термических трещин (рис. 6, а). Толщина сошлифованного слоя после каждого 200 циклов испытаний составляла примерно 0,35...0,40 мм. Минимальная толщина наплавленного износостойкого слоя была достигнута после 2000 циклов испытаний, затем образцы были разрезаны по пятну нагрева и из них были изготовлены макрошлифы (рис. 7, а). Как видно, в этом случае термические трещины переходят из наплавленного в основной металл.

В образцах с подслоем, наплавленным проволокой Св-08А, наблюдается значительно менее выраженная сетка термических трещин (рис. 6, б). В этом случае и глубина распространения трещин по толщине наплавленного металла была меньше. Толщина сошлифованного слоя после каждого 200 циклов испытаний составляла примерно 0,20...0,25 мм. Учитывая небольшой съём материала, на этих образцах удалось провести 2400 циклов испытаний. Образцы после испытаний также были разрезаны и подготовлены макрошлифы (рис. 7, б). В этом случае трещины проходят через износостойкий слой и задерживаются в малоуглеродистом подслое.

Таким образом, усовершенствование методики испытаний термической стойкости путем проведения нескольких этапов с перешлифовкой поверхности образца позволило оценить динамику и характер развития трещин термической усталости по толщине наплавленных слоев и выявить влияние подслоя на характер их распространения.

### Выводы

1. Существующий и достаточно широко применяемый метод оценки термической стойкости, основанный на определении количества циклов нагрев-охлаждение до появления сетки термических трещин, не позволяет провести точную оценку

термостойкости при испытаниях многослойных наплавленных образцов, обладающих достаточно высокой термической стойкостью.

2. Усовершенствование методики испытаний термической стойкости путем проведения нескольких этапов с перешлифовкой поверхности образца позволило оценить развитие трещин термической усталости по толщине наплавленных слоев и выявить влияние подслоя на характер распространения трещин термической усталости.

3. Установлено, что глубина проплавления и характер линии сплавления наплавленных слоев оказывает определенное влияние на термическую стойкость наплавленного образца в целом, что необходимо учитывать при выборе технологии и техники наплавки.

1. *Дульнев Р.А., Котов П.И.* Термическая усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
2. *Тылкин М.А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1971. – 608 с.
3. *Фруммин И.И.* Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 421 с.
4. *Рябцев И.А., Кондратьев И.А.* Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования: справочное пособие. – Киев: Экотехнологія, 1999. – 64 с.
5. *Толстов И.А., Пряхин, А.В., Николаев В.А.* Повышение работоспособности инструмента горячего деформирования. – М.: Металлургия, 1990. – 143 с.
6. *ГОСТ 25.505–85.* Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении.
7. *Школьник Л.М.* Методика усталостных испытаний: справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
8. *Marek A., Junak G., Okrajni J.* Fatigue life of creep resisting steels under conditions of cyclic mechanical and thermal interactions // Archives of Materials Science and Engineering. – 2009. – Vol. 40. – Is. 1. – P. 37–40.
9. *Ланин А.Г.* Методы определения термопрочности (Обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – № 3. – С. 31–47.
10. *Рябцев И.И., Черняк Я.П., Осин В.В.* Блочно-модульная установка для испытаний наплавленного металла // Сварщик. – 2004. – № 1. – С. 18–20.
11. *Рябцев И.А., Бабинец А.А., Рябцев И.И.* Влияние пластичного подслоя на термическую стойкость многослойного наплавленного металла // Автомат. сварка. – 2011. – № 10. – С. 22–26.
12. *Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков / А.А. Бабинец, И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев и др.* // Там же. – 2014. – № 5. – С. 17–21.

Поступила в редакцию 09.07.2015

## **Двенадцатая международная научно-техническая конференция: «НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, СВАРКА»**

25–27 мая 2016 г., Минск, Беларусь

### **Секции конференции**

1. Металлические порошковые материалы. Композиционные порошковые материалы: триботехнические, электротехнические, пористые и специальные. Технологии и моделирование процессов их получения и применения
2. Наноматериалы и нанотехнологии. Сверхтвердые и керамические материалы
3. Инженерия поверхности. Защитные покрытия: материалы, технологии и оборудование для нанесения
4. Новые технологии и оборудование сварочного производства. Соединение и деструкция материалов. Нетрадиционные металлургические технологии

### **Адрес оргкомитета:**

220005, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41,  
Институт порошковой металлургии.  
Тел.: (017) 290-99-93 – Комякова Ольга Витальевна;  
Тел.: (017) 290-95-64 – Макарская Кристина Анатольевна.  
Факс: (017) 292-82-42. E-mail: info50@mail.ru.