

кость нержавеющей стали и эффективно контролируется методом трения в паре «диск-плоскость».

Литература

1. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / А.П. Бурмаков [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.

УДК 621.785:621.81

В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ С НАПЛАВЛЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ

В практике наплавочных работ полноценная термическая обработка деталей используется недостаточно [1, 2]. Наряду с традицией, причинами указанной ситуации являются сложность согласования режимов термической обработки детали и наплавленного слоя и отсутствие данных по закаливанию и прокаливаемости наплавленных слоев.

В целом необходимость проведения термической обработки наплавленных деталей вызвано следующими факторами:

– уровень остаточных напряжений после проведения наплавки превышает допустимый, высока вероятность изломов, например, хрупкого разрушения при ударных нагрузках. Термическая обработка позволяет улучшить структуру и снизить напряжения до допустимого уровня;

– значительная неоднородность свойств, которая связана с ликвацией легирующих элементов. Термическая обработка позволяет значительно повысить однородность структуры и свойств соответственно;

– недостаточный комплекс физико-механических свойств наплавленной детали, например недостаточная ударная вязкость или твердость;

– особенности технологии. Например, во многих случаях при восстановлении необходимо провести отжиг (нормализацию) детали для обеспечения обрабатываемости, а затем провести упрочняющую термическую обработку.

Полноценная термическая обработка значительно расширяет функциональные возможности наплавочных материалов. Концептуально решение задачи по выбору или разработке наплавочного сплава, который термически обрабатывается с деталью, должно основываться на следующих принципах [2]:

– выбор режима термической обработки должен обеспечивать, как минимум, сохранение прочностных свойств основного металла. Как правило, в качестве основного металла применяются углеродистые конструкционные стали. Для таких сталей целесообразно проведение нормализации или улучшения. Выбор вида термической обработки в основном определяется условиями работы, прочностными показателями детали, а также химическим составом основного и наплавленного металла;

– состав наплавочного сплава должен быть экономно-легированным, чтобы обеспечить не общепринятое упрочнение избыточными фазами (карбидами, нитридами, боридами) литого металла, а увеличение абразивной износостойкости за счет мартенситных (бейнитных) структур. Существенное значение для протекания вторичной кристаллизации имеют условия охлаждения;

– длительность операций термической обработки и их количество должно быть минимальным. Например, назначение нормализации как вида термической обработки экономически более обосновано, трудоемкость и затраты электроэнергии для ее проведения незначительны;

– охлаждающие среды по возможности должны быть «мягкими» (вплоть до воздушного охлаждения). Для конструктивных легированных сталей образование закалочной структуры мартенсита или нижнего бейнита может привести к растрескиванию и значительному короблению детали. Легированная сталь имеет меньшую теплопроводность, чем углеродистая, поэтому требует замедленного

нагрева и охлаждения во избежание коробления и трещин. Ограничением также является склонность ряда сталей к отпускной хрупкости;

– режимы нагрева под закалку следует выбирать, ориентируясь в большинстве случаев на температуры растворения карбидов, а не на критическую температуру. В большинстве случаев существует необходимость назначать температуру нагрева выше точки A_{c3} поскольку основным металлом, как правило, является конструкционная сталь. Значительное повышение температуры создает опасность снижения прочностных характеристик основного металла, поэтому желательно подтверждать такие изменения расчетами.

Проведенный анализ термической обработки и кинетики фазовых превращений применительно к деталям, имеющим покрытие [3–6 и др.], привел к выводу, что оценку фазовых превращений и согласование содержания термической обработки деталей с наплавленным покрытием можно проводить следующими путями:

1) наложением расчетных температурных кривых на термокинетическую диаграмму распада аустенита основного и наплавленного металла [2];

2) определением характеристики (например, критической скорости охлаждения), как функции химического состава стали, температуры и размера аустенитного зерна;

3) проведением аналитического расчета двухпараметрического уравнения Аврами.

При термообработке наплавленной детали выбор ее содержания и оптимизацию режимов наиболее просто и наглядно проводить, используя диаграммы термокинетического распада аустенита [7]. Однако сложность состоит в том, что корректно воспользоваться можно только диаграммой для основного металла. Использование же диаграммы наплавленного металла, если такая по составу имеется, имеет смысл только для качественной оценки, в частности, при определении возможного протекания структурных превращений при охлаждении. Это связано с тем, что существующие термокинетические диаграммы получены в условиях, которые не воспроизводят химическую и физическую неоднородность фаз, полученных при наплавке. Поскольку проводить возможно только качественную

оценку, то можно рассматривать ближайšie по химическому составу стали.

Вариантом графического наложения диаграмм является случай, когда они спрогнозированы расчетным методом (как минимум для наплавленного металла) и представлены графиками. Например, на рисунке 1 изображены диаграммы термокинетического (изотермического) распада аустенита для стали 20Г основного металла детали и металла наплавленного слоя (марка стали типа 60XP3).

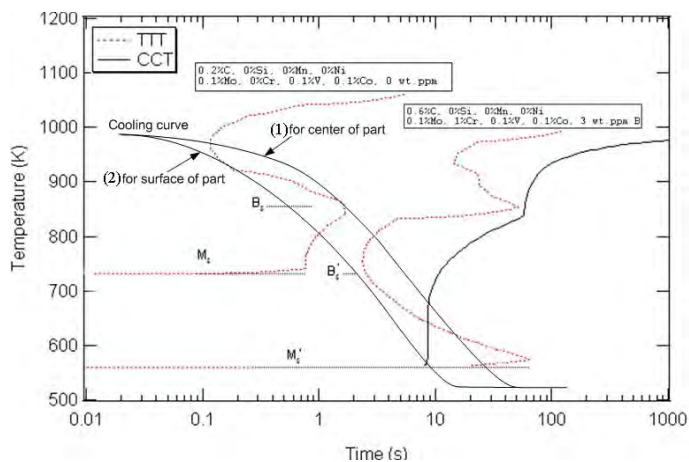


Рисунок 1 – Диаграммы изотермического (TTT) и термокинетического (CCT) распада аустенита для стали 20Г и стали типа 60XP3 (спрогнозировано с помощью EWI Virtual Joining Portal) [10]

Итак, современные представления о кинетике распада аустенита позволяют проводить расчет термокинетических диаграмм. Такой расчет основывается на термодинамической модели твердофазного превращения в сталях по известному химическому составу стали [8–10]. В этом случае, чтобы согласовать режим термической обработки наплавленной детали достаточно рассчитать кривую охлаждения рассматриваемого сечения детали. Отметим, что такое наложение диаграмм справедливо при ряде ограничений.

Зависимости химического состава и критической скорости, полученные Вебером и Рози [6], позволяют определить расчетным путем критическую скорость закалки. Формула рассчитана только с целью использования ее для конструкционных сталей. Недостаток

очевиден – достоверность расчетных данных вне границ применения по химическому составу вызывает сомнение. В дополнение к этому следует отметить структурные и фазовые отличия наплавленного металла.

Расчет двухпараметрического уравнения Авраами и теории изотермической реакции в настоящее время реализуется в программных комплексах ANSYS, MSC, MARC, DEFORM-3D, ThermoSim. Преимущества использования моделирования в этих программных пакетах, построенного на основе метода конечных элементов, заключаются в том, что оно позволяет рассчитывать детали сложной и неправильной формы с детализацией наиболее критичных мест изделия. Верификация полученных данных подтверждает высокую точность расчетов [11], однако для фазовых превращений используются те же диаграммы термокинетического распада, поэтому при их отсутствии расчет не производится.

Таким образом, чтобы согласовать режимы термической обработки при наличии термокинетической диаграммы распада аустенита для наплавленного и основного металла, приемлемым представляется методика графической оптимизации, которая состоит в совместном анализе диаграмм и различных скоростей охлаждения. При затруднениях в подборе диаграммы распада аустенита или ее отсутствии для наплавленного металла предлагается следующая расчетно-экспериментальная методика определения скорости охлаждения наплавленной детали (деталь в виде тела простой формы).

Согласно рассмотренным ранее принципам для технологического процесса упрочнения наплавленных деталей необходимо стремиться выполнить следующие условия:

– охлаждать деталь с определенной медленной скоростью, которая позволяет не входить в зону перлитного (бейнитного) превращения для наплавки, а для основного металла проходить всю зону превращения. Это условие представим в формализованном виде:

$$V_{\text{охл}} \geq V_{\text{кр.напл}}; V_{\text{охл}} < V_{\text{кр.осн}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{охл}}$ – скорость охлаждения детали с наплавленным покрытием, °C/c; $V_{\text{кр.напл}}$ – критическая скорость охлаждения наплавленного

металла, °C/с; $V_{кр.осн}$ – критическая скорость охлаждения основного металла (металла детали), °C/с;

– температуру обработки наплавленной детали принять выше $A_{с3}$, поскольку наиболее важным является конструктивная прочность детали. Заметим, что чем выше температура аустенизации, тем заметнее устойчивость переохлажденного аустенита, что благоприятно сказывается на прокаливаемости именно наплавленного покрытия.

Для практического применения и решения поставленной задачи получения износостойкой структуры покрытия необходимо обеспечить его сквозную прокаливаемость и закаливаемость. В настоящее время прокаливаемость большинства наплавочных сплавов не нормирована, для сплавов, содержащих бор, такая информация вообще иногда противоречива. Необходимо получение и систематизация таких сведений для практического применения.

Реализация методики предполагает следующую последовательность.

1. Расчет критической скорости охлаждения для основного металла ($V_{кр.осн}$). В нашем случае ее определение возможно двумя путями:

– значение критической скорости определяется по термокинетической диаграмме распада аустенита:

$$V_{кр.осн} = (T_n - T_{min})/\tau_{min} , \quad (2)$$

где T_n – температура с которой проводится охлаждение, °C; T_{min} – температура минимальной устойчивости аустенита, °C; τ_{min} – время минимальной устойчивости аустенита, с.

Отметим, что для легированных сталей необходимо предотвратить бейнитное, а не перлитное превращение;

– при отсутствии термокинетической диаграммы, значение определяется по предложенной Вебером и Розе зависимости [6]:

$$\lg V_{кр.осн} = 9,81 - (4,62 \% C + 1,1 \% Mn + 0,54 \% Ni + 0,5 \% Cr + 0,6 \% Mo) + 0,0018 \cdot T_n . \quad (3)$$

2. Выполнение торцевой пробы на образцах, имеющих наплавленные слои.

Для определения прокаливаемости наплавленных слоев использован модернизированный метод торцевой закалки по ГОСТ 5657-69. Стандартная методика не дает возможности исследования наплавленных слоев, потому что образец представляет собой цилиндр цельного металла. Модернизированная методика имеет отличия: наплавленный металл сформирован по образующей цилиндра, причем наплавка производится в предварительно полученные пазы образца. Материал образца – сталь 20Г, сталь 50Г, глубина паза изменяется от 3 до 4 мм. Количество наплавленных пазов с одинаковым составом – 3, температура закалки 820–860 °С. Условия охлаждения: высота свободной струи воды – 40 мм, расстояние от сопла до охлаждаемого торца образца – 12 мм.

Пазы имеют трапецидальную форму для приближения формы валика с формой паза, в этом случае смешивание основного и наплавляемого металла минимально. Форма сечения паза характеризуется коэффициентом формы, который представляет собой соотношение ширины паза (малого основания трапеции) к его высоте. Его оптимальное значение составляет $K_{\phi} = 0,8-1,6$. Номинально размер ширины паза и его высоты варьируется в пределах 5–8 мм. Рекомендованное отношение диаметра цилиндра к глубине паза для рассматриваемого образца составляет 2,5–5,0.

Величина прокаливаемости и закаливаемости определяется аналогично методике, определенной ГОСТ 5657-69, т.е. расстоянием от охлаждаемого торца до точки, имеющей твердость слоя с полумартенситной структурой и значением этой твердости по шкале HRC.

Наплавленный металл по сечению имеет неоднородную структуру (наличие ликваций, различных зон термического влияния), поэтому перед проведением закалки проводится отжиг заготовки образца с наплавленным слоем. Эта операция дает возможность обработать заготовку для снятия напльвов и усилений после наплавки.

Конструкция образца для исследования прокаливаемости наплавленных покрытий защищена патентом Республики Беларусь [12].

3. Выполнение совместного анализа полученных данных, определение по результатам эксперимента критических скоростей охлаждения и критического диаметра основного и наплавленного металла.

4. Проведение выбора охлаждающей среды максимальной «мягкости», с учетом условия (1).

5. Определение для выбранной охлаждающей среды скорости охлаждения (прокаливаемости) основного и наплавленного металла конкретной формы и размеров детали при использовании номограммы Блантера или аналитического выражения [4, 6]:

$$V_{\text{охл}} = c(S/W)^n, \quad (4)$$

где S – площадь поверхности тела, мм^2 ; W – объем охлаждаемого тела, мм^3 ; c и n – коэффициенты, определяемые формой тела и охлаждающей средой.

Исследования прокаливаемости наплавленных слоев проводились по общепринятой методике оценки твердости полумартенситной зоны. Как уже отмечалось ранее, использование стандартных методик расчета прокаливаемости для наплавленного покрытия (SAE J406 (США), по методу Гроссмана и др.) затруднительно, поскольку они имеют свои границы применимости и не учитывают, например, влияние бора.

В качестве наплавочного материала была выбрана поверхностно-легирующая проволока, где в качестве основного легирующего элемента применялся бор [13].

По результатам исследования, учитывая значения твердости полумартенситной зоны [14, с. 175, рисунок 7], определили критическую скорость охлаждения (таблица 1). Сравнение полученных данных с критической скоростью охлаждения и идеальным критическим диаметром, которые рассчитаны по химическому составу наплавленных слоев без участия бора (метод Гроссмана), свидетельствует об увеличении прокаливаемости в исследуемом диапазоне состава на 20–50 % за счет присутствия

бора в твердом растворе. Имея сведения о критической скорости закалки с использованием номограммы прокаливаемости Блантера, возможна оценка критических диаметров прокаливаемости для «мягких» условий охлаждения (масло, спокойная вода).

Таблица 1 – Характеристика охлаждения наплавленных слоев из поверхностно-легированной проволоки У7

Вид ХТО	Время обработки (τ), ч	Критическая скорость охлаждения ($V_{кр.напл.}$), °C/с экспериментальная	Идеальный критический диаметр (D_{∞}), мм	
			экспериментальный	расчетный
В-Сг	2	180	32	23
В-Сг	3	160	34	23
В-Сг-Al	2	230	28	14
В-Сг-Al	3	200	30	15
В-Al-Ti	2	400	22	12
В-Al-Ti	3	360	24	12
В-Mn	2	160	34	28
В-Mn	3	140	38	30

Полученные данные позволяют выбрать термическую обработку всех рассматриваемых наплавочных сплавов в «мягких» охлаждающих средах. Отметим важную особенность: понятие прокаливаемости для наплавленного покрытия имеет смысл при толщинах более 5–8 мм; если она меньше, корректнее вести речь просто о закаливаемости.

Таким образом, для деталей простой формы целесообразно проводить подбор охлаждающей среды согласно рассмотренной расчетно-экспериментальной методике. Суть его состоит в том, что проведя торцовую пробу одновременно наплавленного и основного металла с одинаковой температуры нагрева, мы получаем информацию о прокаливаемости материала наплавки. Затем необходимо провести согласованный выбор подходящего состава охлаждающей среды. Далее провести расчет скорости охлаждения, в выбранной среде используя геометрические характеристики и форму конкретной детали с покрытием. После этого окончательно формируется представление о структуре и свойствах термически обработанной детали с покрытием.

Выводы

1. Предложена расчетно-экспериментальная методика определения скорости охлаждения наплавленной детали в случае отсутствия данных по термокинетической кривой распада аустенита наплавленного слоя. Методика позволяет после проведения торцевой пробы на прокаливаемость проводить выбор режима термической обработки детали с наплавленным слоем.

2. Впервые экспериментально получены кривые прокаливаемости группы борсодержащих наплавочных сплавов. Данные позволили установить критическую скорость охлаждения и идеальный критический диаметр. Сравнение полученных данных с данными, которые рассчитаны по химическому составу наплавленных слоев без участия бора (метод Гроссмана), свидетельствует об увеличении прокаливаемости в исследуемом диапазоне состава на 20–50 % за счет присутствия бора в твердом растворе.

Литература

1. Дашкевич, В.Г. Материаловедческие и технологические аспекты получения термообрабатываемых наплавленных слоев из диффузионно-легированной проволоки / В.Г. Дашкевич // Литье и металлургия. – 2009. – № 1. – С. 169–175.

2. Константинов, В.М. Проблемы термической обработки наплавленных деталей горношахтного оборудования / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич // Горная механика. – 2005. – № 2. – С. 92–96.

3. Йех, Я. Термическая обработка стали / Я. Йех; под ред. Ю.Т. Андреева, В.Б. Фридман. – М.: Металлургия, 1974. – 216 с.

4. Блантер, М.Е. Теория термической обработки / М.Е. Блантер. – М.: Металлургия, 1984. – 328 с.

5. Новиков, И.Н. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

6. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т.: Т. 3 / С.Б. Масленков [и др.]; под общ. ред. С.Б. Масленкова. – М.: Наука и технологии, 2004. – 704 с.

7. Попов, А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – М.: Машгиз, 1961. – 430 с.

8. Caballero, F.G. Design of Advanced Bainitic Steels by Optimisation of TTT Diagrams and T_0 Curves / F.G. Caballero [et al.] // ISIJ International. – Vol. 46 (2006), № 10. – P. 1479–1488.

9. The Calculation of TTT and CCT diagrams for General Steels / N. Saunders [et al.] // Material Science and Technology. – 2004. – Vol. 20. – P. 1567–1579.

10. Material Algorithms Project (MAP) [Электронный ресурс] / Department of materials Science and Metallurgy. University of Cambridge. U.K. – Режим доступа: <http://www.msm.cam.ac.uk/map>. – Дата доступа: 20.12.2008.

11. Computer aided heat treatment planning system for quenching and tempering / Lei Zhang [et al.] [Электронный ресурс] / Department of Mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute. – Режим доступа: <http://www.wpi.edu/>. – Дата доступа: 10.01.2009.

12. Образец для исследования твердости наплавленных поверхностей: пат. 2296 Респ. Беларусь, МПК G 01N 3/40 / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич; заявитель УО «Полоцкий гос. ун-т» – № и 20050205 ; заявл. 11.04.05; опубл. 30.12.05 // Официальный бюллетень / Нац. центр интеллектуальной собственности. – 2005. – № 4. – С. 75.

13. Дашкевич, В.Г. Поверхностно-легированная стальная проволока для наплавки деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.Г. Дашкевич; ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». – Минск, 2009. – 23 с.

14. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.