



УДК 621.791.669.14.018.2/8-194.2

## СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА В СВАРНЫХ ШВАХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО, В. А. КОСТИН, В. Ю. ОРЛОВСКИЙ, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы математические модели, описывающие диаграммы изо- и анизотермического (термокинетического) превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей, с целью их возможной экспериментальной проверки на комплексе физической имитации процессов сварки и термической обработки металлов «Gleeble-3800».

*Ключевые слова:* дуговая сварка, низколегированные стали, металл шва, диаграмма превращений аустенита, моделирование фазового состава

В практике термомеханической обработки сталей широко используются диаграммы изотермического (ИРА) и анизотермического распада аустенита (АРА) [1, 2]. Диаграммы ИРА дают много сведений о характере превращений, но на практике изотермичность достичь довольно сложно. В случае очень быстрого превращения распад аустенита происходит непосредственно на этапе достижения заданной температуры [3], поэтому ИРА диаграммы для времени выдержки менее 10 с не точны. При обработке крупных изделий не достигается основное условие, необходимое для построения диаграмм ИРА, — быстрое охлаждение до заданной температуры. В связи с этим для практических целей диаграммы ИРА уступили место диаграммам АРА (неизотермическим).

В настоящее время условия охлаждения сварных швов хорошо изучены [4, 5]. На основании экспериментальных результатов построены математические модели, адекватно описывающие температуры и скорости охлаждения в различных участках сварного шва. Поэтому в лабораторных условиях можно имитировать охлаждение небольшого образца, температурный режим которого соответствует охлаждению при различных видах и режимах сварки, разному размеру изделий, влиянию различных сред.

Учет ИРА и АРА диаграмм, построенных для низколегированных сталей, является важным фактором для прогнозирования структурно-фазового состояния сварных швов, формирующегося при сварке. Для построения таких диаграмм было проведено много экспериментов [6, 7]. Тем не менее широкий диапазон использования легирующих элементов в сталях наряду с сильной чувствительностью диаграмм АРА к изменению их сос-

тава и влиянием размера зерна означают невозможность создания достаточного количества диаграмм для их практического использования.

В последнее десятилетие была проведена большая работа по разработке математических моделей, которые позволили бы вычислять ИРА и АРА диаграммы для сталей. Почти все без исключения модели ограничиваются использованием их для углеродистых и низколегированных сталей.

Существуют многочисленные публикации, описывающие превращения в сталях, но из них только малая часть пригодна для вычисления ИРА и АРА диаграмм. В работах [8, 9] показано, что вполне возможно точно рассчитать ИРА и АРА диаграммы для низколегированных сталей. В этой модели не делалось различия между диффузионным и промежуточным превращением. Модифицируя уравнения, предложенные Зенером и Хиллертом [10, 11], Киркалди [12] построил модель, позволяющую вычислять количество феррита и перлита, и получил следующее выражение для времени изотермического превращения:

$$\tau_{ITT} = \frac{1}{2^{(N/8)}(\Delta T)^3} \exp \left\{ \frac{Q_{eff}}{RT} \right\} \sum_{j=1}^m \alpha_j C_j \quad (1)$$

где  $N$  — балл зерна в системе ASTM;  $Q_{eff}$  — эффективная энергия активации диффузии;  $\Delta T$  — значение переохлаждения, ниже которого аустенит становится нестабильным (температура  $A_{c3}$ );  $C_j$  — концентрация  $j$ -го элемента;  $\alpha_j$  — константа для каждого элемента.

Значения  $Q_{eff}$  и  $\alpha_j$  были определены экспериментально, подгоняя кривую (1) к экспериментально наблюдаемой кривой ИРА превращения. В результате формула приняла следующий вид [12] (количество каждого элемента принимается в мас. %):

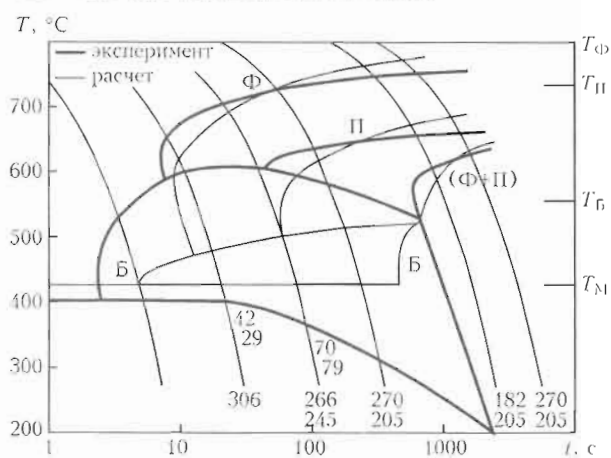


Рис. 1. Сравнение расчетной (сталь 36Cr6) и экспериментальной [12] АРА диаграмм

$$\tau_{0.1\%} = \frac{\exp \left[ \frac{2000}{T} \right]}{2^{(N/8)} (Ae_3 - T)^3} \times (60\% \text{ C} + 90\% \text{ Si} + 160\% \text{ Cr} + 200\% \text{ Mo}). \quad (2)$$

В дальнейшем [12] модель была расширена для моделирования С-кривых превращения перлита и бейнита (рис. 1) и позволила вычислить количество продуктов превращения как функцию времени и температуры:

$$\tau_{\Phi} = \frac{60\% \text{ Mn} + 2\% \text{ Ni} + 68\% \text{ Cr} + 244\% \text{ Mo}}{6 \cdot 2^{(N/8)} (\Delta T)^3 D_{\Phi}} I, \quad (3)$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{1.8 + 5.4(\% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 4\% \text{ Mo} \cdot \% \text{ Ni})}{6 \cdot 2^{(N/8)} (\Delta T)^3 D_{\Pi}} I, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{Б}} = \frac{(2.3 + 10\% \text{ C} + 4\% \text{ Cr} + 19\% \text{ Mo}) 10^{-4}}{6 \cdot 2^{(N/8)} (\Delta T)^2 D_{\text{Б}}} I, \quad (5)$$

где  $I = \int_0^X \frac{dX}{X^{2(1-X)/3} (1-X)^{2X/3}}$ ; X — объемная доля

структурных составляющих;  $D_{\Phi}$ ,  $D_{\Pi}$ ,  $D_{\text{Б}}$  — коэффициенты диффузии соответственно феррита, перлита и бейнита.

Если рассчитана ИРА диаграмма, то по правилу аддитивности Киркалди [13] ее можно трансформировать в АРА диаграмму.

Позднее Бхадешти [14, 15] использовал другую методологию для определения точек начала превращения феррита и бейнита и сооставил свою модель с экспериментом (рис. 2). В дальнейшем модель Бхадешти была усовершенствована Ли [16] с целью расширения границ ее применимости для несколько больших концентраций, чем применяемых в низколегированных сталях.

Одним из недостатков этих моделей было использование термодинамики разбавленных растворов при вычислении температур превращения для среднелегированных, инструментальных и нержавеющих сталей.

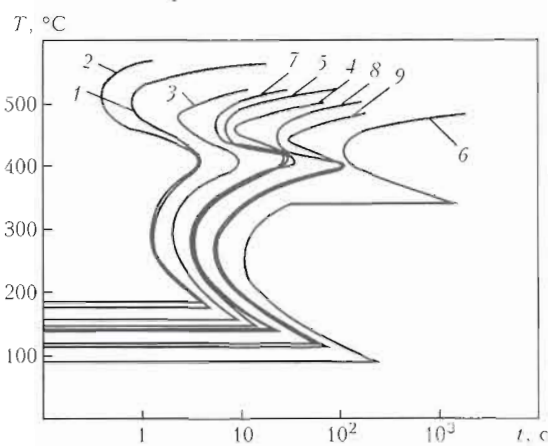


Рис. 2. Расчетные кривые изотермического превращения для ряда сталей [15]: 1 — Fe-0,4C; 2 — Fe-0,4C-2Si; 3 — Fe-0,4C-1Ni; 4 — Fe-0,4C-2Ni; 5 — Fe-0,4C-1Mn; 6 — Fe-0,4C-2Mn; 7 — Fe-0,4C-2Cr; 8 — Fe-0,4C-1Mn-1Cr; 9 — Fe-0,4C-1Mn-1Ni

В работе [17] была предпринята попытка объединения более общих термодинамических моделей с кинетическими для определения возможностей расширения диапазона составов сталей при прогнозировании их АРА диаграмм. Модель Киркалди была выбрана за основу, а эмпирические параметры могли легко контролироваться и изменяться.

Помимо указанных выше моделей, в той или иной степени учитывающих реальные процессы, которые связаны с термодинамикой и кинетикой превращения, существует ряд чисто эмпирических моделей, основанных на обработке экспериментальных результатов. Так, ряд исследователей [18, 19] использует уравнения Авраами для описания структурных составляющих:

$$M = 100(1 - \exp(-k_M w^{n_M})), \quad (6)$$

$$\Phi\Pi = 100 \exp(-k_{\Phi\Pi} w^{n_{\Phi\Pi}}), \quad (7)$$

$$B = 100 - M - \Phi\Pi, \quad (8)$$

где M,  $\Phi\Pi$ , B — количество соответственно мартенсита, феррито-перлита, бейнита в структуре, мас. %; w — скорость охлаждения;  $k_M$ ,  $k_{\Phi\Pi}$ ,  $n_M$ ,  $n_{\Phi\Pi}$  — константы (для низколегированных сталей типа 10Г2ФБ  $k_M = 0,0021$ ,  $k_{\Phi\Pi} = 1,2$ ,  $n_M = 0,487$ ,  $n_{\Phi\Pi} = 0,8$ ).

Проанализировав более ста термокинетических диаграмм распада аустенита низколегированных сталей [7, 20], были предложены модели для оценки доли структурных составляющих в структуре металла ЗТВ:

$$M(\tau) = 1 - \Phi[(\ln \tau - \ln \tau_M) / \ln S_M], \quad (9)$$

$$\Phi\Pi(\tau) = \Phi[(\ln \tau - \ln \tau_{\Phi\Pi}) / \ln S_{\Phi\Pi}], \quad (10)$$

$$B(\tau) = 1 - M(\tau) - \Phi\Pi(\tau), \quad (11)$$



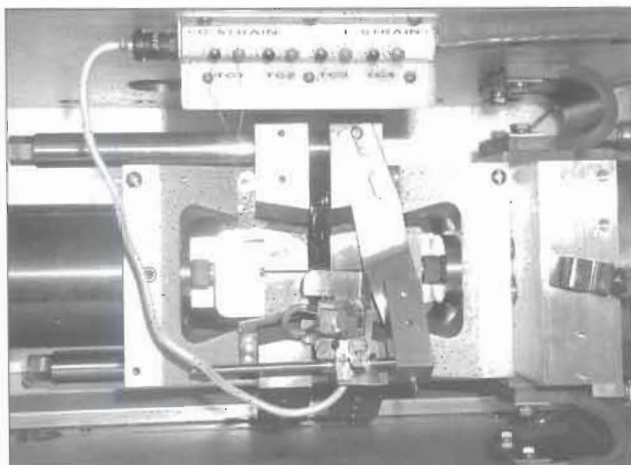


Рис. 3. Внешний вид рабочей камеры установки «Gleeble-3800»

где  $\tau$  — длительность охлаждения от 800 до 500 °С;  $\Phi(z) = 0,5[1 + \text{erf}(z/\sqrt{2})]$  — интегральная функция нормального распределения;  $\tau_M, \tau_{ФП}$  — длительности охлаждения, при которых образуется соответственно 50 % мартенсита или ферритно-перлитной структуры;  $S_M, S_{ФП}$  — константы, характеризующие крутизну кривых изменения содержания мартенсита или ферритно-перлитной структуры при увеличении времени охлаждения.

Просуммировав все изложенное выше, следует, что для построения модели распада аустенита, адекватно описывающей процессы распада в металле швов низколегированных сталей, необходимо получение значительного количества экспериментальных результатов как для определения температур начала и конца формирования структурных составляющих, образующихся в процессе распада аустенита, так и металлографического определения количества продуктов распада. Большое количество материальных и временных затрат часто делает эту задачу трудновыполнимой, однако наличие в ИЭС им. Е. О. Патона самого современного на данный момент комплекса «Gleeble-3800» позволяет ее успешно решить.

Установка «Gleeble-3800» является комплексом (рис. 3), предназначенным для физической имитации процессов сварки, горячей деформации металлов (прокатка, ковка, осадка), а также имитации термической обработки металлов. Испытания на горячее сжатие и растяжение можно проводить как при постоянном, так и переменном значении прилагаемой силы, при этом максимальная сила сжатия может кратковременно достигать 20 т, а максимальное усилие при растяжении образцов до 10 т при температурах нагрева металла до 2000 °С. Данные испытания позволяют определить не только степень деформации металла в зависимости от приложенной силы и температуры, но и параметры процесса, при которых становится возможным возникновение горячих тре-

щин. Скорость деформации при сжатии может достигать 1 м/с.

При имитации процессов термообработки металлов, а также исследовании процессов плавления и кристаллизации максимальная температура нагрева кратковременно может достигать 3000 °С, скорость нагрева и охлаждения до 10000 °С/с. Охлаждение образцов проводится как изнутри образцов, так и снаружи, охлаждающие среды — вода или воздух. Все исследования можно проводить в контролируемой атмосфере.

Наличие в комплексе высокоскоростного дилатометра с индукционным датчиком высокой чувствительности позволяет строить диаграммы термокинетического превращения в автоматическом режиме, что значительно ускоряет время получения и обработки экспериментальных результатов.

Таким образом, в настоящее время созданы все предпосылки для успешного создания и развития математической модели распада аустенита. Результаты, полученные с помощью установки «Gleeble-3800», будут положены в основу базы данных по кинетике термокинетического распада аустенита в сварных швах низколегированных высокопрочных сталей с целью определения как эмпирических коэффициентов, используемых для описания кинетики распада, так и уточнения температурных интервалов превращения характерных структурных составляющих, длительности превращения и конечного структурно-фазового состояния металла шва.

1. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. — М.: Машгиз, 1960. — 495 с.
2. Носиков И. И. Теория термической обработки металлов. — М.: Металлургия, 1978. — 389 с.
3. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 542 с.
4. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 415 с.
5. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
6. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
7. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Großer Atlas schweiß-  
ZUG-Schaubilder. — Düsseldorf: Deutscher Verlag für  
Schweißtechnik, DVS-Verl., 1992. — 176 S.
8. Kirkaldy J. S., Tomson B. A., Baganis E. A. Hardenability  
concepts with applications to steel. — Warrendale, PA:  
AIME, 1978. — 82 p.
9. Kirkaldy J. S., Venugopalan D. Phase transformations in fer-  
rous alloys / Eds A. R. Marder, J. I. Goldstein. — AIME,  
Warrendale, PA: AIME, 1984. — 125 p.
10. Zener C. Kinetics of the decomposition of austenite // Trans.  
AIME. — 1946. — 167. — P. 550-555.
11. Hillert M. Thermodynamics and kinetics isothermal trans-  
formation in steel // Jernkont. ann. — 1957. — 141. — P. 758-  
767.
12. Kirkaldy J. S. Diffusion-controlled phase transformation in  
steel. Theory and applications // Scand. J. Met. — 1991. —  
20. — P. 51-61.
13. Kirkaldy J. S. Advances in phase transformation. — Oxford:  
Pergamon press, 1988. — 238 p.





14. Bhadeshia H. K. D. H. Developments in martensitic and bainitic steels: role of the shape deformation // *Metal Sci.* — 1981. — 15. — P. 175.
15. Bhadeshia H. K. D. H. A thermodynamic analysis of isothermal transformation diagrams // *Ibid.* — 1982. — 16. — P. 159–165.
16. Lee J.-L., Bhadeshia H. K. D. H. Computer simulation of microstructural evolution in thermomechanical processing of steel plate // *Mater. Sci. Eng. A.* — 1993. — 171. — P. 223.
17. The calculation of TTT and CCT diagrams for general steels / N. Saunders, Z. Guo, X. Li et al. <http://www.msm.cam.ac.uk>
18. Захарова И. В. Снижение дефектности сварных соединений низколегированных сталей путем оптимизации технологии сварки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2001. — 20 с.
19. Пекарска В. Математическое моделирование структуры металла ЗТВ при лазерной сварке // *Материалы конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, Киев-ли, 16–20 сент. 2002. — С. 114–117.
20. Seyffarth P., Kasatkin O. Calculation of structural transformation in the welding process. — [1982]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-IX-82).

Mathematical models describing the CCT and TTT diagrams plotted for the welds on low-alloy steels are analysed with a purpose of their possible experimental verification by using the «Gleeble-3800» unit for physical simulation of the metal welding and heat treatment processes.

Поступила в редакцию 16.07.2007

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

**15–18 апреля 2008 г.** в Санкт-Петербурге при поддержке Северо-Западного Федерального округа и Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга состоится 10-я Международная практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». Организаторы: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и НПФ «Плазмацентр».

### Основные направления конференции:

- ✓ технологии диагностики и дефектации, мойки и очистки, восстановления заданной геометрии, упрочнения и восстановления свойств поверхности, механической обработки нанесенных покрытий, окраски и консервации;
- ✓ масла, смазки, клеи и герметики;
- ✓ процессы трения и изнашивания, защита от коррозии, конструкционные и эксплуатационные методы повышения долговечности.

### В рамках конференции будут проходить:

- ✓ школа-семинар «Все методы повышения стойкости инструмента, штампов, прессформ и другой технологической оснастки», где будет рассказано об основных механизмах износа и упрочнения, о рациональном выборе материала инструмента и технологической оснастки, о видах, свойствах и областях применения износостойких покрытий на инструменте, будет продемонстрирован новый процесс финишного плазменного упрочнения с нанесением алмазоподобного покрытия, способный за несколько минут обработки изделий многократно повысить их стойкость;
- ✓ школа-семинар «Наплавка и напыление — выбор технологии, оборудования и материалов», где слушатель узнает о видах износа и повреждений деталей, о преимуществах и недостатках, технико-экономических показателях различных способов наплавки и напыления, об отечественных и зарубежных фирмах, изготавливающих оборудование и материалы для наплавки и напыления.

*Аудитория конференции и школ-семинаров — это представители крупных и средних промышленных предприятий, специалисты научных организаций и высшей школы.*

Более подробную информацию о предстоящей конференции и школах-семинарах можно узнать на сайте [www.plasmacentre.ru/conf](http://www.plasmacentre.ru/conf).

Реквизиты организатора: НПФ «Плазмацентр», 195196, Санкт-Петербург, Таллиннская ул., д. 7А, оф. 16  
Тел./факс: (812) 4452496, (901) 3043191, (812) 5287484  
E-mail: [info@plasmacentre.ru](mailto:info@plasmacentre.ru), [office@plasmacentre.ru](mailto:office@plasmacentre.ru)



## УКРАИНСКО-РОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

6–7 февраля 2008 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины состоялся семинар по сварке, неразрушающему контролю качества и технической диагностике при изготовлении и ремонте оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС с участием российских специалистов. Направленность работы семинара — обеспечение надежности и безопасной эксплуатации атомных энергетических установок.

Российскую сторону представляли специалисты ЦНИИГМАШ (г. Москва) — головной материаловедческой организации РФ в области атомной энергетики и генерального проектировщика оборудования энергоблоков с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 ОКБ «Гидропресс» (г. Подольск). От Украины участие принимали специалисты ИЭС им. Е. О. Патона, ГП НАЭК «Энергоатом», Южно-Украинской АЭС, Ровенской АЭС, Запорожской АЭС, завода «Атомэнергомаш», предприятия «Атомремонтсервис», ОАО «Южтеплоэнергомонтаж» и других организаций. Всего в работе семинара участвовали 52 специалиста.

В ходе работы семинара было заслушано 16 докладов, в том числе четыре доклада с российской стороны. Были представлены работы ЦНИИГМАШ, обобщающие опыт ремонта с использованием сварки оборудования и трубопроводов АЭС за последние пять лет (2003–2007 гг.), а также фундаментальная работа по технологии ультразвукового контроля оборудования и трубопроводов АЭС. Весьма интересные и содержательные доклады были представлены ИЭС им. Е. О. Патона. Были заслушаны результаты работ по ремонтной сварке трубопроводов с использованием процесса TIG и применением активаторов, представлены технологические разработки по подводной сварке при ремонте оборудования АЭС, разработки по новым электродам для ручной электродуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также сделаны сообщения по технологиям нанесения защитных покрытий при ремонте ответственных узлов оборудования. Большой интерес и дискуссию вызвали доклады сотрудников ИЭС о допустимости выяв-



ляемых дефектов в металле трубопроводов и оборудования АЭС. Российские коллеги проявили заинтересованность к разработкам ИЭС по получению полых слитков ЭШП для производства поковок при изготовлении коллекторов парогенераторов и другого корпусного оборудования атомных энергоблоков.

В результате проведенного семинара, взаимных консультаций и обмена опытом между украинскими и российскими специалистами были сформулированы основные направления совместных работ в области сварочных технологий, контроля качества и технической диагностики при изготовлении и ремонте оборудования и трубопроводов АЭС.

А. С. Царюк, канд. техн. наук